
ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

Под редакцией чл.-кор. АН БССР
д-ра техн. наук проф. *А. И. Вейника*



МОСКВА • МАШИНОСТРОЕНИЕ • 1980

Авторы: С. Л. Бураков, А. И. Вейник,
Н. П. Дубинин, А. М. Петриченко, Я. М. Рывкис,
В. С. Серебро, Р. Л. Снежной, Е. А. Суходольская

Рецензент д-р техн. наук проф. Ю. А. Степанов

Литье в кокиль / С. Л. Бураков, А. И. Вейник, Н. П. Дубинин и др. Под ред. А. И. Вейника. — М.: Машиностроение, 1980, 415 с., ил.

В пер.: 3 р. 30 к.

В монографии рассмотрены теоретические основы и особенности технологии литья различных сплавов, механизация и организация производства отливок в кокилях, а также вопросы качества и эффективности. Приведены методы расчетов оптимальных параметров технологии с применением ЭВМ. Рассмотрены все современные разновидности кокилей. Изложены особенности и конкретные технологические режимы литья в кокиль цветных и черных сплавов, а также специфика применения облицованных кокилей. Приведены сведения об однопозиционных и многопозиционных кокильных машинах, а также автоматических линиях.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников литейного производства.

Л 31204-082
038 (01)-80 82-80. 2704020000

ББК 34.61
6П4.1

© Издательство «Машиностроение», 1980 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наиболее существенные изменения в литейном производстве связаны с коренными усовершенствованиями существующих или появлением новых видов литейных форм. Центральная роль литейной формы в производстве отливок подтверждается, в частности, тем, что способы литья различаются между собой, как правило, по признаку формы.

Одним из специальных способов литья является литье в кокиль. Литью в кокиль принадлежит весьма важная роль в производстве машиностроительных заготовок. Возможности данного способа литья позволяют решать многие задачи повышения эффективности и качества продукции в сфере литейного производства. К ним относятся: снижение материалоемкости, повышение коэффициента использования металла, снижение массы и повышение эксплуатационных показателей деталей, увеличение производительности и улучшение условий труда.

За последние 20—30 лет произошли важные изменения в теории и технологии литья в кокиль. На основе использования достижений фундаментальных и технических наук (теплофизики, физической химии, термомеханики, термодинамики необратимых процессов, гидродинамики, физико-химии полимеров, физики контактных явлений, теории кристаллизации и др.) решены многие задачи получения отливок с заданными свойствами, расширения области применения литья в кокиль (как по видам материалов отливок, так и по конструктивным признакам), повышения долговечности кокилей при одновременном снижении затрат на их изготовление и, наконец, создания прогрессивных моделей специального технологического оборудования. Достижения науки способствовали не только созданию новых процессов и разновидностей кокилей, но и позволили систематизировать данные практики, выявив при этом наиболее рациональные технологические приемы и режимы.

В монографии изложены основные положения теории формирования отливки. Сделано это в объеме, достаточном и необходимом для понимания особенностей физического механизма формирования

отливки в кокиле и для обобщения практических данных. Указанные основные положения представляют собой, по существу, теорию литья в кокиль.

Опыт показывает, что кокиль, как никакая другая литейная форма, позволяет получать отливку с заданными свойствами. Поэтому расчетные методы выбора оптимальных параметров процесса литья приобретают весьма важное практическое значение. Исходя из этого авторы монографии рассматривают вопросы применения ЭВМ и методы оценки эффективности технологии и качества отливок.

Полезность расчетных методов в технологии литья в кокиль и соответствующее применение ЭВМ доказаны на практике. Математические методы исследований позволяют дать количественную оценку роли эффектов различной физической природы, выявить пределы возможности технологии, а также выбрать действительно оптимальные параметры процесса для конкретной отливки. Впервые на новой теоретической основе решается исключительно актуальная проблема качества и эффективности, разработаны математические методы планирования этих показателей. По мнению авторов, широкое использование математических методов в любой литейной технологии является условием и в то же время показателем прогресса в литейном производстве.

Авторы монографии стремились к изложению, в основном, достаточно апробированных теоретических положений, приемов, рекомендаций, конструкций и т. п. Однако многие вопросы, рассматриваемые в книге, являются принципиально новыми и выдвигаются в порядке их постановки. Поэтому авторы с благодарностью отнесутся ко всем замечаниям и пожеланиям.

Главы XIX—XXI написаны С. Л. Бураковым и Я. М. Рывкисом; глава VII — А. И. Вейником; главы VIII и XI — Н. П. Дубининым; главы I, IX, XIV — А. М. Петриченко; главы II, IV, VI, X — В. С. Серебро; главы III и XII — Р. Л. Снежным; главы XIII, XV—XVII — Е. А. Суходольской; глава V: параграфы 1 и 3 — А. М. Петриченко, параграф 2 — В. С. Серебро; глава XVIII — В. С. Серебро и Р. Л. Снежным.

Раздел первый

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

1. ПРИЗНАКИ И ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА

По способу заполнения форм металлом и условиям формирования в них отливок между литьем в кокиль и другими способами литья в металлические формы (центробежным, под давлением, намораживанием, выжиманием и др.) существует большее различие, чем между литьем в кокиль и литьем в обычную песчаную форму. Сходство последних процессов бывает настолько большим, что часто практически трудно найти грань между ними: в кокилях сплошь и рядом применяют песчаные стержни или вставки, а в песчаных формах нередко устанавливают металлические холодильники.

Согласно ГОСТ 17819—72 кокиль — это металлическая форма, которая заполняется жидким металлом под действием гравитационных сил. Рис. 1 дает некоторое представление о том, какие промежуточные варианты форм могут встречаться между песчаной (рис. 1, а) и полностью металлической (рис. 1, е) формами: некоторые из «промежуточных» форм затруднительно определенно отнести к песчаным формам или к кокилям.

По конструктивно-технологическому признаку принято считать [25, 107] кокилями литейные формы, металлические части которых составляют их основу и участвуют в формировании конфигурации и свойств отливки. На основании этого представленные на рис. 1, г, д формы следует называть кокилями, а на рис. 1, б, в — песчаными формами с наружными холодильниками. Иные названия «промежуточных» форм не рекомендуются. Следует указать, что именно сочетание в кокиле металлических и песчаных (или керамических) элементов позволяет в ряде случаев успешно применить литье в кокиль для получения деталей сложной конструкции. При этом лучше всего удастся избежать препятствия усадке отливок и повысить стойкость форм.

С целью регулирования скорости затвердевания отливок рабочие поверхности кокиля облицовывают (футеруют) и окрашивают теплоизоляционными красками. Покрывают на кокиль также и для того, чтобы защитить форму от воздействия жидкого

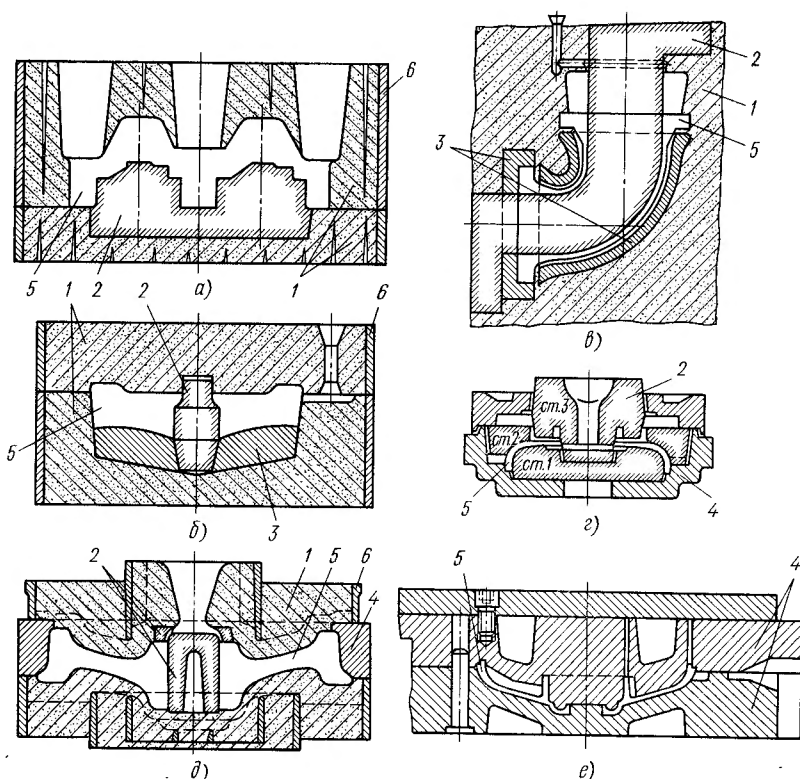


Рис. 1. Конструктивно-технологические признаки литейных форм:
 а — обычная песчаная; б, в — песчаная с холодильниками; г — кокиль с песчаными вставками; д — кокиль с формой-вставкой; е — кокиль без вставок;
 1 — песчаная форма; 2 — стержень; 3 — холодильник; 4 — кокиль; 5 — рабочая полость; 6 — опока

металла и газовой коррозии и тем самым увеличить ее долговечность. Покрытия позволяют значительно уменьшать термические напряжения в кокиле [16]. Толстый слой краски (облицовки) настолько снижает тепловое нагружение кокиля и скорость затвердевания отливки, что могут создаться условия, когда к моменту затвердевания отливки или даже к моменту ее выбивки начальная температура кокиля не изменится.

При постепенном увеличении толщины покрытия форма будет всегда проходить через такое состояние, когда трудно определить, является ли она кокилем, или обычной песчаной формой. «Превращение» кокиля в обычную песчаную форму зависит не только от толщины краски и облицовки, но и от толщины отливки. Переход металлической части формы из кокиля в опоку может быть точно

рассчитан [20, 107]. Приблизненно кокилем можно считать такую литейную форму, которая удовлетворяет условию $X_3 \leq X_1$, где X_1 — характерный размер отливки (половина толщины стенки плоской, радиус цилиндрической и сферической отливок), X_3 — толщина покрытия (краски, облицовки) металлической части формы.

Условие $X_3 \leq X_1$ представляет собой математическое выражение факта влияния кокиля на термические особенности формирования отливки. Ускоренное охлаждение отливки в кокиле связано со свойствами металлического материала формы. Свойствами металла в качестве материала формы объясняются и две другие особенности рассматриваемого процесса. Речь идет о формировании отливки в газонепроницаемой и неподатливой форме. Исключение составляют только некоторые специальные виды кокилей, которые в большей либо меньшей мере податливы и газопроницаемы. Такие формы рассмотрены в гл. X.

ГОСТ 17819—72 не допускаются термины-синонимы «постоянная форма» и «металлическая форма». Оба эти термина не равнозначны понятию «кокиль». Процесс получения отливок в кокилях, естественно, должен называться «литье в кокиль». За кокилями с относительно толстой облицовкой, наносимой по модели, утвердилось название «облицованный кокиль». Это название использовано в сборнике государственных стандартов «Кокили облицованные (ГОСТ 19507—74—ГОСТ 19516—74)».

2. КРАТКАЯ ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Литье в кокиль относится к прогрессивным специальным способам литья с большим будущим. Между тем, это один из древних способов изготовления отливок, появившийся чуть ли не на заре возникновения литейного ремесла. Во всяком случае литейщики прибегли к этому способу сразу же, как только возникла необходимость в массовом производстве отливок с точно воспроизводимыми размерами последних. Древние литейщики разных районов применили первые кокили независимо друг от друга. В настоящее время трудно установить, в какой части света и когда впервые стали использовать кокили. Однако достоверно известно, что почти за пять веков до нашей эры литье в кокиль было развито на юго-востоке и в Северном Причерноморье — в Скифии. В это время в сельском хозяйстве ряда государств Востока началось широкое применение литых чугунных мотыг, серпов, осей телег и других сельскохозяйственных срудий труда и деталей оборудования. Огромную потребность в отливках не могли удовлетворить старые способы литья. Взамен их и был использован вновь открытый способ литья в чугунные кокили.

Скифы, пришедшие с Востока на Причерноморье в VII в. до нашей эры, создали здесь могущественное и обширное государство, добившееся больших военных успехов на Ближнем Востоке, в Малой Азии, противостоявшее сильным государствам на Западе. Для военных целей скифам необходимо было огромное количество пустотелых наконечников стрел, причем требовалось, чтобы эти наконечники стрел были строго одинаковы по своим размерам и массе.

Литейное ремесло в Скифии было высоко развито, об искусстве литья замечательных скифских котлов с восторгом писал Геродот; свидетельством тому служат также многие дошедшие до нашего времени литые изделия. Однако для

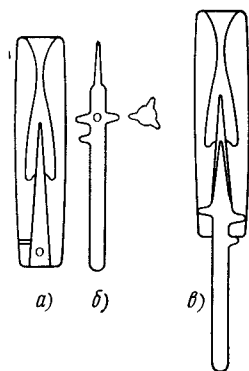


Рис. 2. Кокили Скифии для литья наконечников стрел: а — часть кокиля; б — металлический стержень; в — кокиль в сборе

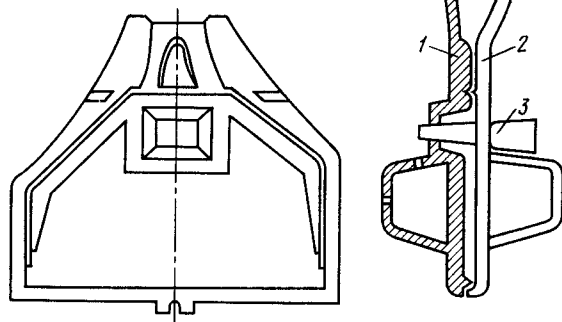


Рис. 3. Кокиль периода Борящихся царств (403—221 гг. до н. э.) для литья чугуных мотыг: 1, 2 — половинки кокиля; 3 — металлический стержень

массового изготовления наконечников стрел существовавшие ранее способы литья, в том числе и литье по восковым моделям, оказались непригодными. Для решения проблемы литейщикам пришлось искать новые пути. Так скифами было впервые изобретено литье в кокиль. Правда, как указывает Б. А. Шрамко, одна из находок археологов — четырехместный кокиль дает основание предполагать, что в Причерноморье литье было известно и в доскифский период. Но других, более достоверных данных, подтверждающих такое предположение, пока не имеется.

Что касается археологических находок скифского периода, то они, как и находки периода Борящихся царств (403—221 гг. до н. э.), свидетельствуют об умелом использовании кокилей древними литейщиками.

Трудно сказать, почему эти древние способы литья в кокиль не получили широкого распространения и почему литейщики последующих столетий и эпох их не заимствовали. Во всяком случае не из-за несовершенства этих процессов. На рис. 2 и 3 приведены эскизы кокилей, свидетельствующие о том, что более 20 веков тому назад литейщики владели сложными способами литья в кокиль, используя даже металлические стержни. Интересно отметить, что после этого способ литья в кокиль не использовался литейщиками более 10 столетий, хотя не исключена возможность его неоднократного появления и исчезновения.

«Пробелы» в истории литья в кокиль объясняются не утерей древних секретов, а тем, что в разные периоды отсутствовали благоприятные условия эффективного использования кокилей. Такие условия появились в России в XVI в., когда потребовалось массовое изготовление чугуных пушечных ядер с достаточным воспроизводством размеров и масс. Существовавшие в то время способы сравнительно развитого литейного производства в России не были пригодны для литья таких ядер, хотя с их помощью решались более сложные проблемы — изготовление колоколов, пушек и других сложных и ответственных отливок. Возрожденный же способ литья в кокиль позволил решить проблему чугуных ядер. А когда отпала необходимость в чугуных ядрах, процесс литья в кокиль вновь «забыли» на несколько веков. Возрождается этот способ лишь в конце прошлого столетия, и уже для литья стальных заготовок: в 90 годах XIX в. на вагоностроительном заводе в г. Риге было освоено литье в кокиль стальных дисков массой 200—300 кг. По тому времени литье стальных дисков было смелым инженерным решением, давшим значительный эффект. Простые кокили успешно были применены для литья чугуных вагонных колес с отбеленными ребрами.

В дальнейшем кокили нашли еще более широкое применение для литья самой разнообразной продукции: вагонных колес, буферов электровозов, тяжелых корпусов редукторов, различной аппаратуры, хозяйственных изделий, тонкостенной посуды и т. д. Впервые было освоено массовое литье в кокиль чугуных изделий толщиной менее 3 мм.

Советскими учеными была разработана строгая научная теория литья в кокиль. Большой вклад в теорию и практику кокильного литья внес основоположник советской научной школы специальных способов литья проф. Н. Н. Рубцов. Многие труды советских ученых переведены почти на все основные языки мира. Советский опыт заимствовали многие технически развитые страны. Литье в кокиль особенно успешно развивается в странах социалистического сотрудничества: ГДР, ЧССР, ПНР и др.

В настоящее время многие цехи и заводы полностью заменили песчаные формы на кокили, получив при этом большой экономический эффект и значительно улучшив качество отливок. Положительный опыт накоплен на заводах «Водоприбор» (Москва), им. П. Монтана (г. Баку), им. Малышева (г. Харьков), «Красный Октябрь» (г. Харьков), сельскохозяйственного машиностроения им. Октябрьской революции (г. Одесса), «Вольта» (г. Таллин), моторном (г. Барнаул) и др.

Значительные работы по изысканию новых конструкций кокилей, их материала, способов изготовления и эксплуатации выполнены в физико-техническом институте АН БССР, научно-исследовательском институте специальных способов литья (НИИСЛ), МВТУ им. Баумана, Харьковском автомобильно-дорожном институте и в других научных организациях, а также на заводах.

3. ДОСТОИНСТВА ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ И ОБЛАСТИ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Возрастающая популярность процесса литья в кокиль обусловлена его несомненными достоинствами и рядом четко выраженных преимуществ перед традиционными способами изготовления отливок [19—21, 25, 52, 53, 106, 107]. Главные из них относятся к эффективности процесса литья и к качеству отливок. Повышение эффективности литейного производства связано с такими достоинствами литья в кокиль, как многократность использования литейных форм, рост производительности труда и снижение себестоимости отливок, улучшение качества отливок благодаря повышению точности и ускоренному охлаждению металла. Само собой разумеется, что снижение брака отливок, повышение их точности, снижение припусков на обработку и т. п. обеспечивает повышение эффективности процесса литья.

Снижение расхода формовочных материалов. С заменой всей или части песчаной формы кокилем сокращается расход формовочных материалов. Польза при этом не только в том, что снижаются затраты на доставку и подготовку формовочных материалов, а разовые формы заменяются многократно используемыми, но и в том, что значительно улучшаются условия труда литейщиков, меньше загрязняется окружающая среда.

Уменьшение источников брака. Известно, что литейная форма находится в сложных условиях взаимодействия с отливкой. Достоинство кокиля заключается в том, что характер этого взаимодействия более стабилен, чем в песчаной форме. В результате число

трудно управляемых факторов, обуславливающих брак отливок, уменьшается.

Качество отливок и свойства сплавов. Затвердевание отливки в кокилях обеспечивает более высокую плотность металла, а также более высокие механические свойства по сравнению со сплавами, полученными в песчаных формах. Исключением является чугун: в силу особых условий кристаллизации в чугуне кокильных отливок часто образуются карбиды и феррито-графитная эвтектика, отрицательно сказывающиеся на свойствах изделий. Так, износостойкость, вязкость и другие свойства чугуна кокильных отливок нередко ниже, чем в отливках, полученных в песчаных формах. Правда в настоящее время существуют надежные меры повышения таких свойств. Как правило, отливки, полученные в кокилях, имеют хорошие точность и чистоту поверхности, малые припуски на обработку, что значительно облегчает их дальнейшую обработку.

Повышение производительности. Известно, что при производстве отливок на изготовление песчаных форм, на приготовление формовочных материалов и на очистку отливок приходится до 80—90% всех трудовых затрат. При литье же в кокили многие из трудоемких операций либо совсем отпадают, либо объем их резко сокращается (например, на сборке форм и очистке отливок). Поэтому переход на литье в кокили часто позволяет повысить производительность труда в литейном цехе в 2—3 раза и больше. При этом ощутимое повышение труда достигается и в механических цехах.

Механизация и автоматизация. Кокили отличаются от обычных песчаных форм большой жесткостью и высокой прочностью, достаточно высокой точностью и стабильностью размеров элементов, а также точностью и надежностью сопряжения последних. Для управления качеством отливок при литье в кокиль приходится учитывать меньшее число факторов, чем при литье в песчаную форму. Такие, например, факторы, как влажность, огнеупорность и газотворность формы, в первом случае оказываются несущественными. Все это создает благоприятные условия для механизации и автоматизации процесса. И только механизированные и автоматизированные процессы литья в кокиль в состоянии конкурировать с современными процессами литья в песчаные формы.

Уменьшение капитальных затрат. Для изготовления одних и тех же отливок в кокилях требуется значительно меньше производственных площадей, чем при литье в песчаные формы. Это не только потому, что некоторые участки упрощаются или сокращаются (например, смесеприготовительные и обрубные), но благодаря сокращению времени на сборку форм, затвердевание отливок и т. д. По опыту ряда заводов с переходом на кокильное литье съем с 1 м² производственной площади увеличивается в 2—4 раза.

Следовательно, для создания литейных цехов и участков литья в кокиль требуется меньше капитальных затрат.

Ускорение подготовки кадров. Так как при литье в кокиль упрощаются многие технологические операции, а также заметно уменьшаются трудно устранимые источники брака, то значительно упрощается и задача подготовки кадров литейщиков. Если на подготовку квалифицированного формовщика иногда требуются годы, то квалифицированным кокильщиком становятся за несколько недель или, в крайнем случае, за два-три месяца.

Снижение себестоимости отливок. Многократность использования кокилей, уменьшение затрат на изготовление форм значительно удешевляют отливку. Этому же способствует снижение брака и улучшение качества отливок, а также уменьшение капитальных затрат, расхода металла и т. п. Все это в конечном итоге приводит к снижению себестоимости отливок. Во всех цехах страны, где внедрено литье в кокиль, себестоимость отливок на 20—30% ниже, чем в цехах с традиционными способами изготовления отливок.

Изложенное характеризует технико-экономические преимущества литья в кокиль. Более подробные сведения по этому вопросу можно найти в гл. VII и в третьем и четвертом разделах. В гл. VII приведены наиболее общие критерии качества и эффективности и дается сравнение литья в кокиль с другими видами литья. В третьем и четвертом разделах указаны конкретные показатели качества отливок из различных сплавов и экономической эффективности рассматриваемого способа литья.

Литье в кокиль успешно применяется в производстве отливок из серого и высокопрочного чугунов, алюминиевых, магниевых и медных сплавов. В отдельных случаях в кокилях получают детали из стали и ковкого чугуна. Трудно найти такую отрасль машиностроения, где бы не занимались литьем в кокиль либо не использовали отливки, полученные таким способом.

В кокилях получают детали различных габаритных размеров, массы.

Весьма разнообразны конструктивные особенности отливок, получаемых в кокилях: от простых типа опорных плит, колосников, болванок и втулок до сложных типа картеров двигателей, головок блоков цилиндров, ребристых корпусов электродвигателей и стоек плугов. Литьем в кокиль получают детали с особыми свойствами: повышенной герметичности, износостойкости (например, чугунные с поверхностным и местным отбелом), окалинностойкости и др. Важно подчеркнуть, что в кокилях производят детали различного, в том числе весьма ответственного назначения.

ТЕПЛОВЫЕ ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

1. РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

Главным вопросом теории литья является формирование отливки, которое обусловлено комплексом явлений различной физической природы. В этом комплексе ведущая роль принадлежит тепловым явлениям: изменение температуры отливки — первопричина происходящих в ней процессов. Поэтому тепловые основы являются центральным звеном теории каждого способа литья.

Однако для литья в кокиль тепловые основы играют исключительную роль. Во-первых, в кокилях, как ни в какой другой литейной форме, имеются широкие возможности изменения термических условий формирования отливки: выбором, например, состава и толщины покрытия, способа и режима внешнего охлаждения формы. Во-вторых, тепловое состояние кокиля — решающий фактор его долговечности. Следовательно, изучение теплообмена между отливкой и кокилем является не только теоретической, но и важной практической задачей.

Практические задачи производства отливок в кокилях, которые решаются методами тепловой теории литья, можно разделить на три группы. К первой относятся определение закона изменения температуры и затвердевания отливки в зависимости от толщин покрытия и стенки кокиля, термофизических свойств их материалов, режима охлаждения формы и других факторов. В результате решения задач этой группы устанавливаются закономерности формирования микро- и макроструктуры (условий питания) отливки, характер возникающих в ней термических напряжений и длительность технологического цикла.

Ко второй группе относятся задачи, которые можно рассматривать как обратные по отношению к первой. В круг этих задач входят выбор геометрических и термофизических свойств покрытия и кокиля, а также режима охлаждения последнего с целью обеспечения заданных условий формирования отливки. К таким условиям относятся, например, линейная скорость затвердевания и перепады температур между элементами отливки. При соблюдении заданных условий достигаются необходимые параметры качества отливки: прочность, твердость, точность и т. д.

Третья группа задач охватывает условия эксплуатации кокилей. Вследствие решения задач этой группы определяются: продолжительность термического цикла, которая обеспечивает заданную начальную температуру формы; период, в течение которого температура кокиля соответствует параметрам нанесения покрытия; величина термических напряжений и деформаций кокиля;

разогрев формы потоком расплава как один из факторов ее эрозии и др.

Решение (с разной степенью точности) перечисленных задач оказывается возможным с помощью расчетных формул, приведенных в настоящей главе. Охватывают они наиболее распространенные и типичные случаи литья. Для специальных случаев указывается соответствующая литература.

Следует подчеркнуть, что приведенные формулы относятся к определенным условиям литья. Условия эти оговариваются подробно и поясняются схемой (рис. 4). Получение аналитических решений, пригодных для всех разновидностей отливок и кокилей, либо вообще невозможно, либо сопряжено с громоздкостью конечных результатов. Необходимые упрощения достигаются с помощью специальных методов теории литья [20].

2. ТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ В КОКИЛЕ С ТОНКОСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Особенности процесса. Основным принцип исследования термических явлений в системе отливка — кокиль заключается в установлении их главных особенностей и реализуется с помощью параметрического критерия X_3/X_1 (см. рис. 4). Для термических условий литья в кокиль с тонкослойным покрытием $X_3/X_1 \ll 1$. Из этого неравенства вытекают два важных следствия. Первое заключается в том, что теплоаккумулирующая способность покрытия пренебрежимо мала по сравнению с теплоаккумулирующей способностью отливки. Второе сводится к тому, что покрытие

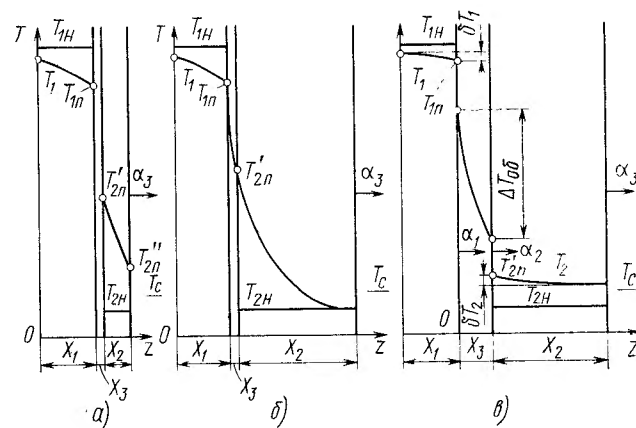


Рис. 4. Схемы температурных полей в отливке и кокиле:

а — тонкостенный кокиль с тонкослойным покрытием; б — массивный кокиль с тонкослойным покрытием; в — облицованный кокиль

можно рассматривать как плоскую (в термическом смысле) однослойную или многослойную стенку. Оба следствия позволяют учесть термическое сопротивление кокильного покрытия как термическое сопротивление плоской (одно- или многослойной) стенки в стационарном случае.

С учетом рассмотренных следствий в монографии [20] детально исследованы условия формирования отливки в гипотетической (фиктивной) среде, температура которой $T_{с.ф}$ — величина постоянная. Теплообмен между отливкой и такой средой осуществляется с коэффициентом теплопередачи $\alpha_{1ф}$. Способы выбора $T_{с.ф}$ и $\alpha_{1ф}$ как расчетных параметров рассмотрены ниже. Идеи и выводы работы [20] позволяют рассчитать термические условия формирования отливок во многих разновидностях кокилей.

Охлаждение потока металла. Изменение температуры потока металла в кокиле

$$\frac{\theta_1}{\theta_{зал}} = \frac{T_1 - T_{с.ф}}{T_{зал} - T_{с.ф}} = \exp \left[-A \left(t - \frac{y}{u} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } A = \frac{\alpha_{1ф}}{R_c \rho_1' c_1'}, \quad R_c = \frac{dV_1}{dF_1}.$$

Здесь R_c — приведенный размер струи; ρ_1' , c_1' — плотность и удельная теплоемкость жидкого металла; u — скорость движения металла, y — координата, отсчитываемая от фронта потока (на носике $y = 0$).

Из формулы (1) следует, что температура любого сечения струи уменьшается во времени по экспоненциальному закону.

Отвод теплоты перегрева. Закон изменения температуры металла на стадии отвода теплоты перегрева имеет вид

$$\frac{\theta_1}{\theta_{1н}} = \exp \left(-\frac{F_1 \alpha_{1ф}}{M_1 c_1'} t \right), \quad (2)$$

где $\theta_{1н}$ — начальная температура расплава; F_1 — поверхность отливки; M_1 — масса отливки. Температура $\theta_{1н}$ определяется по формуле (1), если положить в ней $t = t_1$ (t_1 — продолжительность стадии заливки).

Из выражения (2) следует, что продолжительность стадии отвода теплоты перегрева

$$t_2 = \frac{M_1 c_1'}{F_1 \alpha_{1ф}} \ln \frac{\theta_{1н}}{\theta_{кр}}. \quad (2')$$

В формуле (2') $\theta_{кр}$ — температура кристаллизации, отсчитанная от $T_{с.ф}$.

Затвердевание. Выражения для расчетов стадии затвердевания намного сложнее, чем в предыдущих случаях. Вид этих выраже-

ний зависит от геометрической формы и интенсивности охлаждения отливки, определяемой величиной критерия Био

$$Bi_1 = \frac{\alpha_{1ф}}{\lambda_1} X_1,$$

где λ_1 — теплопроводность материала отливки. В частности, при $Bi_1 \gg 1$ нарастание твердой корочки плоской отливки описывается зависимостью

$$\xi = \sqrt{\frac{2n(n+1)a_1}{L(n+1)+1}} t. \quad (3)$$

При этом линейная скорость затвердевания

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{a_1 n}{\left(L + \frac{1}{n+1} \right) \xi}. \quad (4)$$

Если $Bi_1 \ll 1$,

$$\xi = \frac{a_1}{X_1} \frac{Bi_1}{L} t = \frac{\alpha_{1\theta_{кр}}}{r_1 \rho_1} t; \quad (3')$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \frac{a_1}{X_1} \frac{Bi_1}{L} = \frac{\alpha_{1\theta_{кр}}}{r_1 \rho_1}. \quad (4')$$

В формулах (3) и (4)

$$L = \frac{r_1}{c_1 \theta_{кр}};$$

(r_1 — удельная теплота кристаллизации материала отливки, c_1 — удельная теплоемкость); $a_1 = \lambda_1 / c_1 \rho_1$ — коэффициент температуропроводности затвердевшей корки, n — показатель параболы, описывающей температурное поле затвердевшей корочки.

Формулы для расчетов стадии затвердевания цилиндрических, сферических, а также плоских отливок при любом значении Bi_1 имеют относительно сложный вид и поэтому здесь не приводятся. Интересующиеся могут найти их в монографии [20]. Там же рассмотрен вопрос о выборе численного значения n . Для практических расчетов можно принять $n = 1$.

Продолжительность стадии затвердевания t_3 можно определить по формуле типа (3), если положить в ней $\xi = X_1$.

Охлаждение затвердевшей отливки. На четвертой стадии — стадии охлаждения затвердевшей отливки — температура металла уменьшается по всему объему одновременно. На этой стадии при произвольном Bi_1 температурное поле плоской отливки описывается выражением

$$\frac{\theta_1}{\theta_{кр}} = \left[1 - \frac{1}{1 + \frac{n}{Bi_1}} \left(\frac{z}{X_1} \right)^n \right] \exp \left[-\frac{F_0}{(n+1)^{-1} + Bi_1^{-1}} \right], \quad (5)$$

где $Fo = \frac{a_1 t}{X_1^2}$. Для центра отливки $z = 0$, на ее поверхности $z = X_1$ (см. рис. 4, а, б).

Если интенсивность охлаждения отливки мала ($Bi_1 \ll 1$), то расчетная формула принимает более простой вид:

$$\frac{\theta_1}{\theta_{кр}} = \exp(-Bi_1 Fo). \quad (6)$$

Формула эта применима для отливок произвольной конфигурации.

Задача об охлаждении отливки вне формы относится к числу стандартных задач теории теплообмена и поэтому здесь не рассматривается.

Выбор расчетных параметров. Как указывалось, расчетные формулы (1)–(6) справедливы, если $T_{с.ф}$ — величина постоянная. К такой расчетной схеме сводится процесс теплообмена в тонкостенном кокиле при любом режиме его охлаждения (воздухом, водой, водо-воздушной смесью, маслом и др.) и в массивном кокиле, охлаждаемом с малой интенсивностью (например, естественно на воздухе).

Для тонкостенного кокиля (см. рис. 4, а) соблюдается условие $\frac{X_2}{X_1} \ll 1$.

Согласно этому условию количество теплоты, аккумулированное кокилем, пренебрежимо мало в сравнении с количеством теплоты, отдаваемой отливкой в окружающую среду. Поэтому роль кокиля в процессе теплообмена сводится к дополнительному термическому сопротивлению между двумя телами — отливкой и средой, охлаждающей кокиль. Таким образом, величина $T_{с.ф}$ в рассматриваемом случае равна T_c , а коэффициент теплопередачи $\alpha_{1ф}$ к среде с температурой T_c равен α_1 , причем

$$\alpha_1 = \frac{1}{\frac{X_2}{\lambda_2} + \frac{X_{кр}}{\lambda_{кр}} + \frac{X_r}{\lambda_r} + \frac{1}{\alpha_3}}. \quad (7)$$

В этой формуле X_r и $X_{кр}$ — толщины газового зазора между отливкой и кокилем и слоя краски; λ_r и $\lambda_{кр}$ — коэффициент теплопроводности, соответственно смеси газов, находящихся в зазоре, и краски и α_3 — коэффициент теплоотдачи от кокиля к охлаждающей его среде. Здесь уместно отметить, что тонкослойное покрытие кокиля, толщина которого обозначена X_3 , включает в общем случае слой или слои краски и газовый зазор.

Закономерности образования газового зазора и методы расчета X_r рассмотрены в следующей главе. Значение λ_r зависит от состава газов и рассчитывается по правилу аддитивности. Данные о величинах $\lambda_{кр}$, найденных экспериментальным путем для красок различных составов, указаны в главе о покрытиях. Там же приведены формулы для определения $\lambda_{кр}$. Дополнительные сведения

по этому вопросу можно найти в работах [17–19, 54]. Величина α_3 находится по формулам общей теории теплообмена. Рекомендации для практических расчетов α_3 имеются в работах по литейной теплофизике [21–24].

Для массивного кокиля (см. рис. 4, б) соблюдается условие $X_2/X_1 \approx 1$, что означает соизмеримость теплоаккумулирующих способностей отливки и кокиля. Ясно, что в этом случае нельзя пренебречь теплоаккумулирующей способностью кокиля и поэтому нельзя принять в качестве $T_{с.ф}$ значение температуры среды, которая охлаждает кокиль. В то же время нельзя выбрать в качестве $T_{с.ф}$ и температуру кокиля: температура эта не является постоянной величиной.

Чтобы избежать в данном случае трудностей, в работах [16, 19] предложен и экспериментально обоснован особый способ, согласно которому в качестве расчетной температуры среды принимают среднюю калориметрическую температуру T_k системы отливка—кокиль, усредненную за время t , т. е.

$$T_{с.ф} = T_k = \frac{T_{зал} + \frac{r_1}{c_1} + mT_{2п} - \frac{1}{2} \frac{Q_{окр}}{M_1 c_1}}{1 + m}, \quad (8)$$

$$\text{где } m = \frac{M_2 c_2}{M_1 c_1}; \quad Q_{окр} = \int_0^t \alpha_3 (T_{2п}' - T_c) F_3 dt;$$

M_2 — масса кокиля; c_2 — удельная теплоемкость материала кокиля; $T_{2п}'$ — температура охлаждаемой поверхности кокиля; F_3 — площадь наружной поверхности формы. Остальные обозначения сохраняются прежними.

Так как температура $T_{2п}'$ определяется в результате решения задачи о теплообмене между отливкой и формой, то $Q_{окр}$ и, следовательно, $T_{с.ф}$ находятся методом последовательных приближений. В первом приближении нужно положить $Q_{окр} = 0$. Практика расчетов показала, что в условиях естественного охлаждения кокиля на воздухе достаточно, как правило, первого приближения.

Температура $T_{с.ф}$, найденная по формуле (8), по сути своей является величиной фиктивной. С ее помощью реальный процесс теплообмена между отливкой и кокилем расчленяется на два независимых, один из которых заключается в охлаждении отливки в среде с постоянной температурой $T_{с.ф}$, а с другой — в нагреве кокиля в той же среде.

Так как T_k является фиктивной, то выбор $\alpha_{1ф}$ осуществляется особым образом [19, 20].

В первом приближении

$$\alpha_{1ф} = \alpha_1' \frac{T_{1п} - T_{2п}}{T_{1п} - T_{с.ф}},$$

а коэффициент теплоотдачи к кокилю

$$\alpha_{2\phi} = \alpha'_1 \frac{T_{1н} - T_{2н}}{T_{с.ф} - T_{2н}},$$

где α'_1 — коэффициент теплопередачи через тонкослойное покрытие:

$$\alpha'_1 = \frac{1}{\frac{X_r}{\lambda_r} + \frac{X_{кр}}{\lambda_{кр}}}.$$

В качестве температуры $T_{1н}$ можно выбрать $T_{зал.}$, а при небольших перегревах $T_{кр.}$

Если в расчете $T_{кр.}$ не учитывается $Q_{окр.}$, то теплоотдачу в окружающую среду можно учесть с помощью принципа суперпозиции. В соответствии с этим принципом на температурное поле отливки и кокиля накладывается понижение температуры при охлаждении системы отливка — кокиль в целом. Однако такой прием правомерен лишь при малой интенсивности охлаждения формы.

Можно вообще не учитывать теплоотдачу с наружной поверхности кокиля, если его аккумулирующая способность много больше аккумулирующей способности отливки. Условие, соответствующее данному случаю, имеет вид

$$\frac{X_2}{X_1} \gg 1, \text{ или } \frac{M_2 c_2}{M_1 c_1} \gg 1.$$

Тогда, согласно формуле (8), $T_{с.ф} = T_{кр} = T_{2н}$, а $\alpha_{1\phi} = \alpha'_1$, т. е. роль среды, в которой охлаждается отливка, играет кокиль, причем его температура в течение всего процесса не меняется [19].

Следует отметить, что расчеты процесса охлаждения отливок в тонкостенном и массивном кокиле осуществляются по одним и тем же формулам (1)–(6). Различие заключается только в выборе расчетных значений $T_{с.ф}$ и $\alpha_{1\phi}$. Но методы определения температурных полей тонкостенных и массивных кокилей оказываются различными.

Температурное поле кокиля. Определение температурного поля кокиля необходимо для анализа условий его работы (величины и характера термических напряжений и деформаций, вероятности протекания фазовых и химических превращений в материале рабочей стенки), определения режима принудительного охлаждения и допустимой частоты заливки, выбора условий нанесения покрытия, установления величины теплопотерь в окружающую среду и при решении других практических задач.

Температурное поле тонкостенного кокиля (см. рис. 4, а) рассчитать весьма просто. Находим удельный тепловой поток на поверхности отливки

$$q = \alpha_1 (T_{1н} - T_c), \quad (9)$$

где $T_{1н}$ — температура поверхности отливки. На стадии отвода теплоты перегрева $T_{1н} = T_1$ и в конце затвердевания

$$T_{1н} = (T_{кр} - T_c) \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{n}{Bi_1}} \right) + T_c.$$

Для четвертой стадии $T_{1н}$ вычисляем по формуле (5) (при $z = X_1$) или (6) (при $Bi_1 \ll 1$). Далее находим

$$q = \frac{\lambda_2}{X_2} (T'_{2н} - T''_{2н}); \quad (10)$$

$$q = \alpha_3 (T'_{2н} - T_c), \quad (11)$$

где $T'_{2н}$ и $T''_{2н}$ — температуры стенки кокиля на обеих ее поверхностях. Таким образом, для определения температурного поля тонкостенного кокиля необходимо решить систему уравнений (9)–(11).

Температурное поле массивного кокиля (рис. 4, б) определяется как температурное поле тела при одностороннем нагреве средой, температура которой равна $T_{с.ф}$, а коэффициент теплоотдачи равен $\alpha_{2\phi}$. Для этого могут быть использованы формулы работы [18]. Теплоотдачу в среду, охлаждающую кокиль, можно учесть с помощью принципа суперпозиции. Условие его использования такое же, как и при расчетах охлаждения отливки.

Особые случаи и методы расчета. Наибольшую сложность для теории представляет случай охлаждения отливки в массивном кокиле с водяным охлаждением. Трудность эта связана с тем, что при анализе необходимо учитывать как теплоаккумулирующую способность формы, так и теплоотдачу в окружающую среду. Использование принципа суперпозиции в данном случае оказывается невозможным вследствие большой интенсивности теплообмена между кокилем и охлаждающей средой.

Задача о теплообмене в системе отливка-водоохлаждаемый кокиль решена в работе [127]. Однако полученные в ней формулы громоздки и поэтому здесь не приводятся. Их использование на практике облегчает применение ЭВМ.

Приведенные выше методы расчетов термических условий формирования отливки в кокилях с тонкослойным покрытием можно рассматривать как относящиеся к наиболее распространенным условиям. Однако они не исчерпывают всех частных случаев, которые встречаются на практике. Дополнительные сведения по этому поводу можно найти как в уже упомянутой литературе, так и, например, в работах [3, 6, 21, 25, 49, 56, 84]. Математические методы оптимизации термических условий литья исследуются в работах П. И. Христиченко.

Влияние покрытия и охлаждения кокиля. Тепловая теория литья дает возможность исследовать влияние основных конструк-

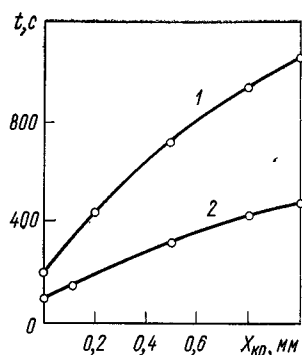


Рис. 5. Зависимость продолжительности затвердевания алюминиевой (1) и чугунной (2) отливки от толщины кокильного покрытия

рого X_2 составляла 48 мм. Кокиль охлаждался в естественных условиях. Как видно, продолжительность затвердевания почти пропорциональна толщине покрытия $X_{кр}$ [3].

На рис. 6 представлены зависимости отношения $Q_{окр}/Q_3$ от относительной толщины стенки формы X_2/X_1 в условиях естественного охлаждения [20]. Величина Q_3 представляет собой количество теплоты, которое теряет отливка к моменту t_3 полного затвердевания. Из графиков видно, что относительная роль внешнего охлаждения кокиля уменьшается по мере возрастания X_2 . При $X_2/X_1 > 1$ величина внешних теплопотерь оказывается весьма незначительной.

Принудительное охлаждение кокиля тем эффективнее повышает скорость затвердевания и охлаждения отливки, чем меньше термическое сопротивление на ее поверхности. Отсюда следует, что

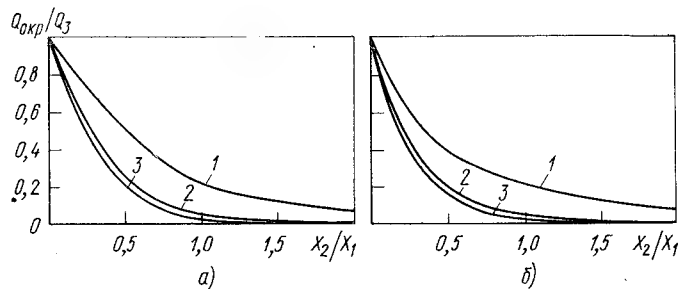


Рис. 6. Зависимость относительного количества теплоты, теряемой в окружающую среду, от X_2/X_1 :
а — стальная отливка; б — чугунная отливка; 1 — $\alpha_1 = 11,63$; 2 — $\alpha_1 = 116,3$; 3 — $\alpha_1 = 1163$ Вт/(м²·К)

тивных и технологических параметров кокилей на термические условия формирования отливки. Наиболее важные результаты этих исследований сводятся к следующему.

Покрытие кокиля определяет интенсивность охлаждения отливки. Путем изменения $\lambda_{кр}$ и $X_{кр}$ представляется возможным в широких пределах регулировать условия охлаждения металла. На рис. 5 в качестве примера приведены кривые изменения продолжительности затвердевания плоских алюминиевых отливок толщиной $2X_1 = 100$ мм и чугунных отливок толщиной $2X_1 = 80$ мм в зависимости от толщины слоя краски. Опыты проводили с кокилем, толщина стенки кото-

принудительное охлаждение формы целесообразно сочетать с уменьшением $X_{кр}$ и X_2 и повышением $\lambda_{кр}$.

Влияние толщины стенки кокиля. Одним из центральных вопросов является влияние толщины стенки кокиля на условия охлаждения отливки. Изучали его многие авторы. В работах [19, 107] кратко излагаются история вопроса и точки зрения различных авторов. Очень четко сформулирована задача Н. Н. Рубцовым и Г. Ф. Баландиным. В книге [19] теоретически и экспериментально показано, что толщина кокиля влияет на процесс затвердевания по-разному, в зависимости от относительных, а также абсолютных размеров отливки и формы, температурных условий процесса и т. д.

В частности установлено, что при увеличении (от нуля) толщины X_2 стенки кокиля по сравнению с половиной толщины X_1 стальной или чугунной отливки время t_3 полного затвердевания металла (при $X_1 = \text{const}$) вначале несколько возрастает (скорость затвердевания падает). Это объясняется повышением термического сопротивления формы при передаче теплоты от отливки к окружающей среде. Затем кривая проходит через максимум и после этого время затвердевания резко падает. При этом снижается роль теплоты, переданной в окружающую среду, и возрастает роль теплоаккумулирующей способности формы. При достаточно больших X_2 толщина стенки кокиля практически перестает влиять на время и скорость затвердевания отливки. Впоследствии все эти выводы были многократно теоретически и экспериментально проверены и подтверждены [21, 25].

Весьма существенно то, что влияние X_2 зависит от кривизны стенки кокиля. В массивном цилиндрическом кокиле с полостью малого диаметра $2X_1$ дивергенция (расхождение) температурного поля на поверхности соприкосновения с отливкой значительно больше, чем в кокиле с полостью большого диаметра. Дивергенция имеет максимальное значение при $X_1 \rightarrow 0$. При больших X_1 дивергенция стремится к нулю, т. е. при больших X_1 цилиндрический кокиль по своим свойствам приближается к плоскому. Чем выше дивергенция, тем больше скорость теплоотвода. Поэтому скорость теплоотвода в кокиль при больших X_1 заметно ниже, чем при малых. Минимальная скорость получается при $X_1 \rightarrow \infty$, т. е. у плоской стенки [25]. Точно такая же картина дивергенции наблюдается у отливки: с увеличением X_1 дивергенция в ее поверхностном слое уменьшается, что также приводит к снижению скорости теплоотвода.

Из всего сказанного становится ясной сложная картина влияния толщины стенки формы на процесс затвердевания отливки. Понятно также, почему в литературе можно встретить самые противоречивые мнения по этому вопросу — различные авторы проводили свои эксперименты в неодинаковых условиях, поэтому

некоторые из них пришли к выводу, что с ростом X_2 скорость затвердевания отливки уменьшается, другие утверждают, что с увеличением X_2 скорость затвердевания возрастает, и, наконец, третьи считают, что X_2 на скорость затвердевания не влияет. В действительности правы все исследователи: в определенных условиях при небольшом изменении X_2 может наблюдаться любая из перечисленных картин.

Современное состояние термодинамической теории литья позволяет в каждом конкретном случае рассчитать фактическую зависимость скорости затвердевания металла от толщины X_2 стенки формы. При этом важно помнить, что на скорость затвердевания существенное влияние оказывают температурные условия процесса, абсолютные размеры отливки и формы, их конфигурация, термофизические свойства, условия внешнего охлаждения формы и т. д. В соответствии с этим и конкретизируется относительная роль толщины стенки металлической формы X_2 .

Влияние начальной температуры кокиля. Если отливка охлаждается в тонкостенном кокиле, то $T_{2н}$ практически не влияет на процесс. Это объясняется пренебрежимо малой теплоаккумулирующей способностью формы в сравнении с теплоаккумулирующей способностью отливки. О влиянии $T_{2н}$ массивного кокиля на условия охлаждения отливки можно судить по формуле (8): чем больше относительная масса формы (или $X_2 : X_1$), тем значительнее роль $T_{2н}$. В условиях естественного охлаждения и при $X_2 : X_1 > 1$ эта роль становится определяющей. К такому выводу легко прийти, если вспомнить, что при данном условии влияние $Q_{окр}$ пренебрежимо мало.

3. ТЕРМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ В ОБЛИЦОВАННОМ КОКИЛЕ *

Особенности процесса. В технологии литья в облицованные кокили тепловые расчеты процесса формирования отливки играют особую роль: природа облицованного кокиля создает возможность управления условиями охлаждения каждого элемента отливки. Достигается это выбором различной толщины облицовки для каждого элемента.

Для термических условий формирования отливки в облицованном кокиле с толстослойным покрытием (см. рис. 4, в) принципиальное значение имеет тот факт, что толщина облицовки $X_{об}$ соизмерима с характерным размером отливки X_1 . Анализ тепловых процессов, протекающих при данном условии, показал следующее.

Период охлаждения отливки может быть достаточно четко разделен на стадии. На стадии заливки тепловая роль кокиля

чрезвычайно мала. Поэтому первые порции металла в облицованном кокиле охлаждаются так же, как и в обычной песчаной форме. На последующих стадиях процесса кокиль играет заметную роль. При этом температурные перепады по толщинам стенок отливки δT_1 и кокиля δT_2 пренебрежимо малы по сравнению с перепадом температур $\Delta T_{об}$ по толщине облицовки.

Облицовка в подавляющем большинстве случаев представляет собой плоскую в термическом смысле стенку: $X_{об}$ значительно меньше радиуса кривизны элемента отливки. Теплообмен в системе отливка—облицовка—кокиль осложняется термическими сопротивлениями на поверхностях контакта этих тел. Сопротивления возникают вследствие деформационных явлений (коробления кокиля, отслоения облицовки, усадки отливки и т. п.), а также нагара — отложения продуктов термической диссоциации материала облицовки. Термические сопротивления могут быть и результатом технологических мероприятий: окраски облицовки противопожарной либо другой краской, нанесения на кокиль разделительного подслоя, включая анодирование поверхности алюминиевого облицованного кокиля.

Основные положения сформулированного физического механизма процесса теплообмена в системе отливка—облицованный кокиль подтверждаются экспериментами. Результаты некоторых из них приводятся ниже.

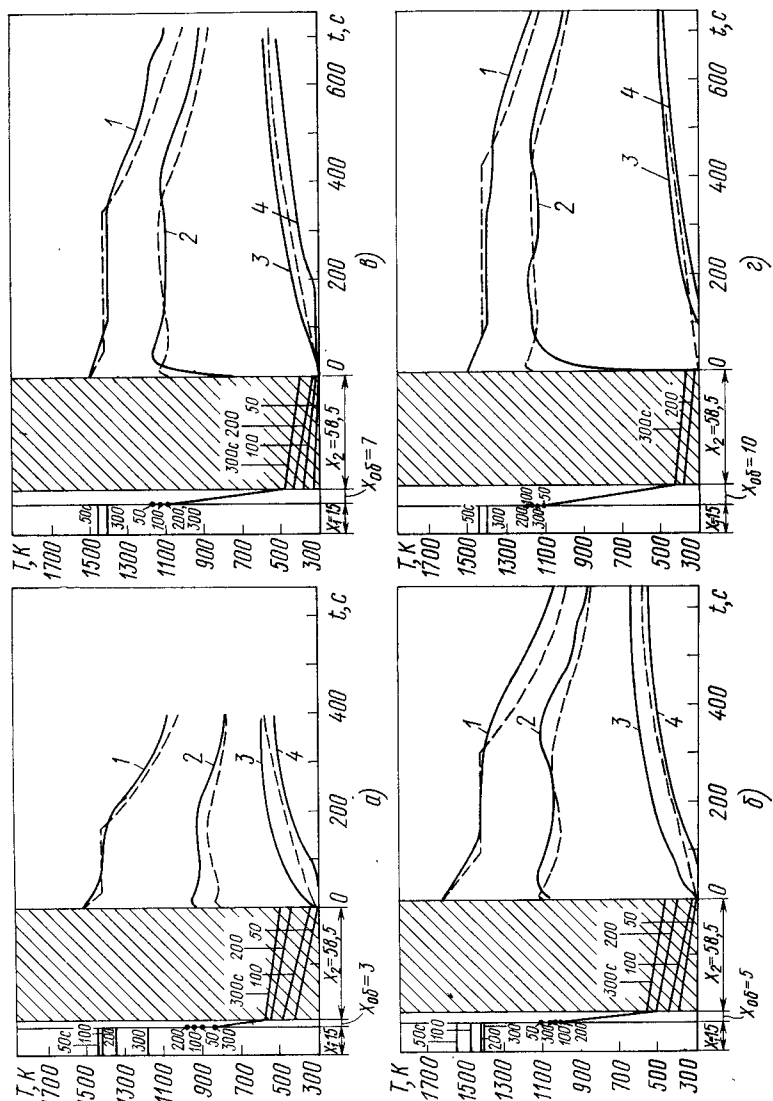
Лабораторные формы состояли из двух пластин размером $58,5 \times 200 \times 200$ мм общей массой 36 кг. Облицовка представляла собой кварцевый песок, плакированный 2% связующего ПК-104. Облицовка твердела при 453—473 К в течение 120 с. Температуры облицовок и кокилей измеряли с помощью ХА — термопар из проволоки диаметром 0,5 мм и многоточечного потенциометра ЭПП-09. Формы заливали в вертикальном положении. Опыты проводили с технически чистым алюминием, чугуном и сталью. Для измерения температур алюминиевых и чугунных отливок применяли ХА-термопары из проволоки диаметром 0,5 мм, а для измерения температур стальных отливок — ПП-термопары из проволоки такого же диаметра. В последнем случае спай защищали наконечниками из кварцевого стекла.

На рис. 7 в качестве примера показаны температурные поля чугунной (3,52—3,63% С, 2,2—2,43% Si, 0,45—0,65% Mn, до 0,03% S и до 0,05% P) отливки, облицовки и кокиля в зависимости от $X_{об}$. Из этих данных следует, что δT_1 и δT_2 пренебрежимо малы в сравнении с $\Delta T_{об}$ при различных толщинах облицовки, входящих в применяемый на практике интервал значений $X_{об}$. Наблюдаются также скачки температур на границе отливка—облицовка, что объясняется образованием на этой границе газового зазора.

Обработкой экспериментальных данных, полученных в описанных условиях, была найдена примерная величина газового

* Особенности технологии литья в облицованные кокили рассмотрены в гл. XVIII.

Рис. 7. Температурные кривые чугунной отливки ($2X_1 = 30$ мм) и облицованного кокиля ($X_2 = 58,5$ мм) при толщине облицовки 3 мм (а), 5 мм (б), 7 мм (в) и 10 мм (г). 1 — центр отливки; 2 — рабочая поверхность облицовки; 3 — рабочая поверхность кокиля; 4 — внешняя поверхность кокиля (цифры у точек и линий в секундах)



зазора X_r . При заливке алюминия и $X_{об} = 5 \div 7$ мм оказалось, что $X_r = 0,625$ мм, а при заливке чугуна и такой толщине облицовки $X_r = 0,738$ мм. Значения эти являются приближенными, но по ним можно судить о порядке величины зазора. Зазор между отливкой и облицовкой в ряде случаев достигает значительной величины и составляет несколько миллиметров. Объясняется это «выжиманием» отливки из кокиля вследствие силового взаимодействия между ними при усадочном процессе, либо свободной усадкой всей отливки. Здесь необходимо отметить, что чем больше величина X_r , тем уже возможность управления условиями охлаждения отливки путем изменения $X_{об}$.

В описанных выше опытах облицовку наносили непосредственно на рабочую поверхность кокиля. Тем не менее наблюдались скачки температур на границе облицовка—кокиль. Как указано выше, скачки эти могут быть следствием отложения продуктов термической деструкции смоляного связующего облицовки, на что впервые было обращено внимание в работе [128].

Термическое сопротивление на внутренней поверхности кокиля может возникнуть также из-за отхода (отслоения) облицовки. Е. Шурман и В. Домен рассчитали примерную величину зазора X_r между облицовкой и кокилем [181, 182]. Для этой цели они использовали температурные кривые, снятые в экспериментах, аналогичных описанным выше. Опыты проводили при заливке чугунных пластин размером 150×150 мм. Кокиль имел стенки толщиной 60 мм. Толщина облицовки составляла 2, 4, 6, 8 и 10 мм. В описанных опытах X_r находилась в пределах $0,02—0,05$ мм. При этом установлено, что отсутствует закономерность в величине X_r : величина зазора не зависела от температурного напора между облицовкой и кокилем.

Охлаждение потока металла. Из предыдущего ясно, что закон изменения температуры θ_1 потока металла в облицованном кокиле аналогичен таковому для обычной песчаной формы. При движении потока с постоянной скоростью u величина θ_1 находится по формуле (1), в которой $T_{с.ф}$ заменяется на $T_{2н}$ и α_1 на выражение

$$\alpha_1 = \frac{b_{об}}{\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{y}{u}}},$$

где $b_{об}$ — коэффициент аккумуляции теплоты материала облицовки.

Момент t_1 достижения расплавом температуры $T_{лик}$ определяется из формулы (1), если положить в ней $T_1 = T_{лик}$.

Температура облицовки на стадии заливки. Технологическое значение метода расчета температурного поля облицовки на стадии заливки заключается в том, что он предоставляет возмож-

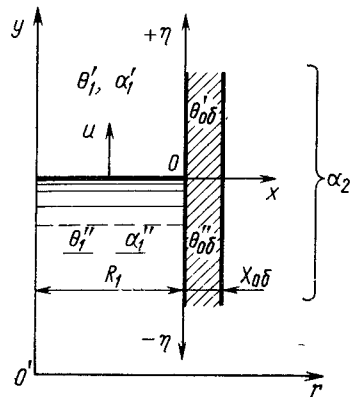


Рис. 8. Схема к расчету температурного поля облицованного кокиля на стадии заливки

ность оценить эрозию поверхности формы. Этот вопрос специально рассматривается в гл. VI.

При решении задачи о температурном поле облицовки в период заливки можно считать, что температура металла есть величина постоянная. Такое допущение является следствием неравенства $\Delta T_{\text{пер}} \ll T_{\text{кр}}$. Кроме того, из сказанного ранее следует, что температура кокиля на стадии заливки металла величина

практически постоянная. Указанные обстоятельства учитывали при построении математической модели процесса. Последняя представляла собой задачу теплопроводности, записанную в подвижных координатах. Расчетная модель поясняется схемой, показанной на рис. 8 (одним штрихом обозначены величины, относящиеся к участку выше зеркала металла). Подвижная система координат связывается с неподвижной системой выражениями $\eta = (y - ut)/R_1$ и $x = (r - R_1)/R_1$, где u — скорость; R_1 — радиус потока. Таким образом,

$$-\infty \leq \eta \leq +\infty, 0 \leq x \leq n = \frac{X_{\text{об}}}{R_1}.$$

Расчетные формулы, полученные при решении рассмотренной задачи, имеют следующий вид. Температура облицовки на участке, который лежит перед фронтом потока (над зеркалом металла по рис. 8),

$$\theta'_{\text{об}} = D'_1 \varphi'_1(x) e^{-k'_1 \eta} + \theta'_1 \varphi'_2(x), \quad (12)$$

температура облицовки на участке, который находится в контакте с расплавом,

$$\theta''_{\text{об}} = D''_2 \varphi''_1(x) e^{-k''_2 \eta} + \theta''_1 \varphi''_2(x), \quad (13)$$

где $\varphi'_1(x) = 1 + \text{Bi}_1 x - k'_1 \frac{x^2}{2} \left(k'_1 + \frac{u R_1}{a_{\text{об}}} \right) \left(1 + \text{Bi}_1 \frac{x}{3} \right)$;

$$\varphi'_2(x) = \text{Bi}_1 x \left(\frac{N'_1}{N'_0} - 1 \right) + \frac{N'_1}{N'_0};$$

$$\varphi''_1(x) = 1 + \text{Bi}_1 x - k''_2 \frac{x^2}{2} \left(k''_2 + \frac{u R_1}{a_{\text{об}}} \right) \left(1 + \text{Bi}_1 \frac{x}{3} \right);$$

$$\varphi''_2(x) = \text{Bi}_1 x \left(\frac{N''_1}{N''_0} - 1 \right) + \frac{N''_1}{N''_0};$$

k'_1 и k''_2 — отрицательный и положительный корни уравнений

$$N_2^{(j)} k^2 + N_1^{(j)} k - N_0^{(j)} = 0.$$

Здесь

$$N_2^{(j)} = n \left\{ 1 + \frac{n}{2} \left[\text{Bi}_1^{(j)} + \text{Bi}_2 \left(1 + \text{Bi}_1^{(j)} \frac{n}{3} \right) \right] \right\};$$

$$N_1^{(j)} = \frac{u R_1}{a_{\text{об}}} N_2^{(j)}; N_0^{(j)} = \text{Bi}_1^{(j)} (1 + \text{Bi}_2 n) + \text{Bi}_2;$$

$$N^{(j)} = \text{Bi}_1^{(j)} (1 + \text{Bi}_2 n), \text{ где } \text{Bi}_1^{(j)} = \alpha_1^{(j)} R_1 / \lambda_{\text{об}};$$

$$\text{Bi}_2 = \alpha_2 R_1 / \lambda_{\text{об}}, a_{\text{об}} = \lambda_{\text{об}} / (c_{\text{об}} \gamma_{\text{об}}).$$

Произвольные постоянные D рассчитывают по формулам

$$D'_1 = k'_2 \frac{\theta'_1 \frac{N'_1}{N'_0} - \theta''_1 \frac{N''_1}{N''_0}}{k'_1 - k'_2}; \quad D''_2 = k'_1 \frac{\theta'_1 \frac{N'_1}{N'_0} - \theta''_1 \frac{N''_1}{N''_0}}{k'_1 - k'_2}.$$

В выражениях (12) и (13) температура отсчитывается от температуры кокиля как от нуля.

Примеры расчетов с помощью формул (12) и (13) показаны в виде кривых на рис. 9. Относятся они к реальным условиям литья чугуна в облицованный кокиль. В расчетах принято: $\theta'_1 = 0$, $\theta''_1 = 1200$ град., $R_1 = 0,05$ м, $X_{\text{об}} = 0,005$ м, $\lambda_{\text{об}} = 0,621$ Вт/(м·К), $a_{\text{об}} = 0,409 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\alpha'_1 = 0$.

Остальные параметры указаны на графиках. Видно, что температура поверхности формы на фронте потока ($\eta = 0$ и $x = 0$) при $u \rightarrow 0$ весьма чувствительна к малым изменениям скорости. Так, в случае $\alpha'_1 = 500$ Вт/(м²·К) и $u = 0$ $\theta'_{\text{об}} = \theta''_{\text{об}} = 571$ град., а для движения с очень малой скоростью — 0,002 м/с — эта температура падает до 7 град. В случае $\alpha'_1 = 1000$ Вт/(м²·К) и аналогичных изменениях u температура равна 652 и 8 град. соответственно.

Из приведенного примера следует также, что с увеличением u уменьшается разогрев поверхности формы в точках, удаленных от фронта потока, причем в этих точках чувствительность к изменению скорости

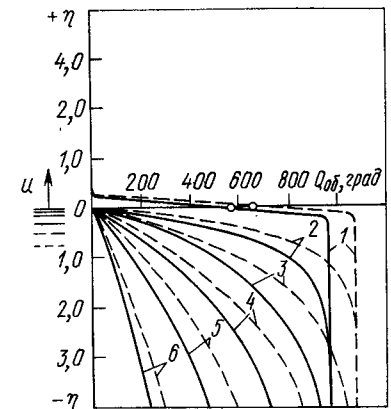


Рис. 9. Расчетные кривые изменения температуры рабочей поверхности облицовки в зависимости от скорости u движения расплава:

1 — $u = 0$; 2 — $u = 0,002$; 3 — $u = 0,005$; 4 — $u = 0,010$; 5 — $u = 0,020$; 6 — $u = 0,050$ м/с. Сплошные кривые — $\alpha'_1 = 500$ Вт/(м²·К); штриховые кривые — $\alpha'_1 = 1000$ Вт/(м²·К)

не имеет выраженной зависимости от диапазона изменения величины u .

Теплообмен на последующих стадиях. Математическое исследование процесса теплообмена между отливкой и облицованным кокилем на последующих стадиях формирования отливки проведено в работе [128]. Полученные при этом результаты таковы. На стадиях отвода теплоты перегрева и охлаждения затвердевшей отливки температуры отливки θ_1 , облицовки $\theta_{об}$ и кокиля θ_2 описываются выражениями

$$\theta_1 = \sum_{i=1}^2 D_i \exp(k_i Fo); \quad (14)$$

$$\theta_{об} = \sum_{i=1}^2 D_i W_i(x) \exp(k_i Fo); \quad (15)$$

$$\theta_2 = \sum_{i=1}^2 D_i A_i \exp(k_i Fo), \quad (16)$$

где θ — температуры, отсчитанные от температуры окружающей среды как от нуля ($\theta = T - T_c$);

$$D_1 = \frac{\theta_{1н} A_2 - \theta_{2н}}{A_2 - A_1}; \quad D_2 = \frac{\theta_{2н} - \theta_{1н} A_1}{A_2 - A_1};$$

$$W_i(x) = 1 + m_1 k_i \left[\frac{1}{Bi_1} + x + \left(\frac{1}{m_1} + \frac{k_i}{Bi_1} \right) \frac{x^2}{2} + k_i \frac{x^3}{6} \right];$$

$$A_i = 1 + m_1 k_i (L_1 + k_i L_2).$$

Величины k_i являются корнями уравнения

$$N_2 k^2 + N_1 k + N_0 = 0,$$

в котором

$$N_0 = \frac{Bi_{3F}}{m_1}; \quad N_1 = 1 + \frac{m_2 + n}{m_1} + Bi_{3F} L_1;$$

$$N_2 = m_2 L_1 + Bi_{3F} n L_2 + n \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{2} \right);$$

$$L_1 = \frac{1}{Bi_2} \left(1 + \frac{n}{m_1} \right) + \frac{1}{Bi_1} + n \left(1 + \frac{n}{2m_1} \right);$$

$$L_2 = \frac{1}{Bi_2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{2} \right) + \frac{n}{2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{3} \right).$$

В формулах (14)–(16) приняты обозначения: $Fo = \frac{a_{об} t}{R_1^2}$, x — безразмерная координата ($0 \leq x \leq n = \frac{X_{об}}{R_1}$),

$$m_1 = \frac{c_1 M_1}{c_{об} \rho_{об} R_1 F_1}; \quad m_2 = \frac{c_2 M_2}{c_{об} \rho_{об} R_1 F_2};$$

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1}{\lambda_{об}} R_1; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2}{\lambda_{об}} R_1; \quad Bi_{3F} = \frac{\alpha_3 F_3}{\lambda_{об} F_2} R_1,$$

где $a_{об}$ — коэффициент температуропроводности материала облицовки; R_1 и $X_{об}$ — половина толщины или радиус стенки отливки и толщина облицовки; t — время; c — удельная теплоемкость; M — масса; ρ — плотность; F — площадь поверхности охлаждения; $\alpha_{1,2,3}$ — коэффициенты теплоотдачи на поверхностях соответственно отливки, облицовки и кокиля; λ — коэффициент теплопроводности. Индексы 1, «об» и 2 в обозначениях параметров и физических свойств относятся соответственно к отливке, облицовке и кокилю, а индекс «н» обозначает начальное состояние.

На стадии затвердевания процесс описывается выражениями:

$$V_1 = D \frac{N'_2}{m_3 N'_1} \left[\exp \left(-\frac{N'_1}{N'_2} Fo \right) - 1 \right] + \frac{N'_0}{N'_1} Fo; \quad (17)$$

$$\theta_{об} = \theta_{кр} + DW'(x) \exp \left(-\frac{N'_1}{N'_2} Fo \right) - m_3 \frac{N'_0}{N'_1} \left(\frac{1}{Bi_1} + x \right); \quad (18)$$

$$\theta_2 = \theta_{кр} - \left(\theta_{кр} - \theta_{2н} - m_3 L'_1 \frac{N'_0}{N'_1} \right) \exp \left(-\frac{N'_1}{N'_2} Fo \right) - m_3 L'_1 \frac{N'_0}{N'_1}, \quad (19)$$

$$\text{где } D = \frac{\theta_{кр} - \theta_{2н} - m_3 \frac{N'_0}{N'_1}}{n L'_2 \frac{N'_1}{N'_2} - L'_1}; \quad m_3 = \frac{r_1 \rho_1 a_{об}}{\lambda_{об} F_1 R_1};$$

$$W'(x) = \frac{1}{Bi_1} + x - \frac{N'_1}{N'_2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{x}{3} \right) \frac{x^2}{2}; \quad N'_0 = \frac{Bi_{3F}}{m_3} \theta_{кр};$$

$$N'_1 = 1 + Bi_{3F} L'_1; \quad N'_2 = m_2 L'_2 + Bi_{3F} n L'_2 + n \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{2} \right);$$

$$L'_1 = \frac{1}{Bi_1} + \frac{1}{Bi_2} + n; \quad L'_2 = \frac{1}{Bi_2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{2} \right) + \frac{n}{2} \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{n}{3} \right).$$

В формулах (17)–(19) обозначено: V_1 — объем затвердевшего металла; $\theta_{кр}$ — температура кристаллизации, отсчитанная от температуры окружающей среды; r_1 — удельная теплота затвердевания. Штрихи сверху обозначают, что соответствующие величины относятся к стадии затвердевания.

Начальные значения температур для стадии заливки задаются условиями расчета, а для последующих стадий определяются

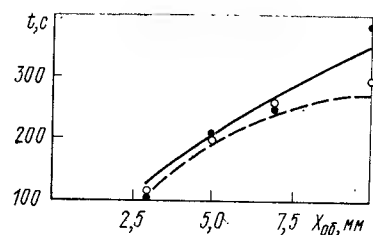


Рис. 10. Зависимость продолжительности затвердевания плоской алюминиевой (штриховая кривая) и чугунной (сплошная кривая) отливки толщиной $2X_1 = 30$ мм от толщины облицовки

расчетом предыдущих стадий. По формулам (17)—(19) можно рассчитать также процесс эвтектоидного превращения; для этого необходимо вместо $\theta_{кр}$ и r_1 под-

ставить соответствующие значения температуры и теплоты фазового перехода.

На рис. 7 в качестве примера штриховыми линиями показаны результаты расчетов по формулам (14)—(19). Как видно, расчетные кривые хорошо согласуются с экспериментальными. Еще более наглядное представление о точности рассмотренного расчетного метода дает рис. 10. На нем в виде линий нанесены результаты расчетов продолжительности затвердевания отливок. Там же для сравнения точками показаны экспериментальные величины. Расхождение между расчетом и экспериментом оказалось менее 10%.

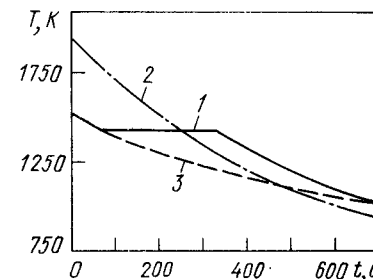
Сопоставление расчетных и экспериментальных данных дает возможность комплексно оценить физическую и математическую точность расчетного метода. Под физической точностью понимается адекватность физической модели фактическому механизму теплопереноса в системе отливка—облицованный кокиль, а под математической — точность решения соответствующей математической задачи.

В работе [129] дана оценка математической точности формулы (17). Сделано это для частного случая, который представляет собой стадию затвердевания плоской отливки в теплоизолированном облицованном кокиле ($\alpha_3 = 0$) при идеальном контакте между телами, участвующими в теплообмене ($\alpha_1 = \alpha_2 = \infty$). Выбор для сравнения данного частного случая объясняется тем, что только для него известно строгое математическое решение. Показано, что приведенное решение задачи дает погрешность всего в несколько процентов. Показано также: при $Fo \rightarrow 0$ математически строгое решение, полученное с помощью преобразования Лапласа, имеет весьма значительную погрешность. Объясняется это плохой сходимостью тригонометрического ряда, который появляется в результате решения задачи операционным методом.

Сказанное в параграфе 2 об определении α_3 относится и к случаю литья в облицованные кокили.

Методы упрощенных расчетов. Формулы (14)—(19) представляют собой результат решения задачи о теплообмене в облицованном кокиле в наиболее общей физической постановке. Для частных условий литья расчетные выражения можно упростить. Если облицовка не окрашена, то на стадии отвода теплоты перегрева

Рис. 11. Кривые охлаждения отливки, соответствующие постадийному расчету (1), одностадийному по фиктивной температуре заливки (2) и одностадийному по $c_{1ф}$ (3)



необходимо принять $\alpha_1 = \infty$. Если значения $\lambda_{об}$ (и, следовательно, $a_{об}$) найдены из эксперимента в предположении, что между отливкой и облицовкой, а также облицовкой и кокилем термический контакт идеальный, и если эти величины (по существу эффективные) используются для расчетов, то в формулах для всех стадий следует принять $\alpha_1 = \alpha_2 = \infty$. Наконец, при охлаждении отливки в толстостенном кокиле ($M_2 \gg M_1$) допустимо положить $\alpha_3 = 0$, что свидетельствует о пренебрежимо малой величине теплотерьер в окружающую среду по сравнению с теплосодержанием системы отливка—кокиль.

На практике часто необходимо знать не постадийный характер изменения температуры отливки и длительность каждой стадии, а общее время охлаждения отливки до температуры выбивки. Для этого можно заменить расчет реальной отливки расчетом воображаемого тела, которое охлаждается без изменения физического состояния. Очевидным условием такой замены является равенство количеств теплоты, теряемых реальной отливкой и расчетным (фиктивным) телом. Тогда удельная теплоемкость фиктивного тела

$$c_{1ф} = \frac{c'_1(T_{1н} - T_{затв}) + r_1 + c_1(T_{затв} - T_{выб}) + r'_1}{T_{1н} - T_{выб}}, \quad (20)$$

где c'_1 — удельная теплоемкость расплава, r'_1 — удельная теплота эвтектоидного превращения. Если температура выбивки выше температуры эвтектоидного превращения, в формуле (20) необходимо принять $r'_1 = 0$. При данном методе расчета в формулах (14)—(16) c_1 заменяют $c_{1ф}$.

Известен еще один прием одностадийного расчета процесса охлаждения отливки. Основан он на учете r_1 с помощью соответствующего увеличения расчетной величины $T_{1н}$, т. е. температуры заливки. Анализ показал, что этот прием из-за большого увеличения начального температурного напора между воображаемой отливкой (расчетным телом) и формой дает занижение расчетного времени охлаждения отливки до $T_{выб}$ [20]. На рис. 11 приведены

кривые охлаждения отливки в облицованном кокиле. В расчетах было принято: $T_{зал} = 1503$ К, $c'_1 = 837$ Дж/(кг·К), $c_1 = 750$ Дж/(кг·К), $r_1 = 268 \cdot 10^3$ Дж/кг, $T_{кр} = 1423$ К, $T_{выб} = 1050$ К, $T_{2н} = 293$ К, $T_c = 293$ К, $c_{об} = 795$ Дж/(кг·К), $c_2 = 512$ Дж/(кг·К), $\rho_1 = 7200$ кг/м³, $\rho_{об} = 1500$ кг/м³, $\rho_2 = 7500$ кг/м³, $a_{об} = 0,868 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\alpha_1 = 333,4$ Вт/(м²·К), $\alpha_2 = \infty$, $\alpha_3 =$

$= 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $F_1 = F_2 = F_3 = 0,08 \text{ м}^2$, $\lambda_{об} = 1,035 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $X_{об} = 0,007 \text{ м}$, $M_1 = 8,675 \text{ кг}$, $M_2 = 36 \text{ кг}$.

Из расчетных кривых видно, что завышение начальной температуры приводит к существенно большей ошибке, чем увеличение удельной теплоемкости материала расчетной отливки, особенно в начале процесса охлаждения отливки. Обращает на себя внимание то, что к концу расчетного периода (к моменту достижения отливкой температуры выбивки) кривая, рассчитанная по $c_{1ф}$, сближается с кривой, найденной из расчета по стадиям. Таким образом, расчет по эквивалентной фиктивной теплоемкости позволяет более точно определить продолжительность охлаждения отливки до температуры выбивки, чем расчет по фиктивной начальной температуре.

Одним из параметров процесса литья в облицованные кокили является температура внешней поверхности облицовки. Желательно, чтобы к моменту удаления отливки эта поверхность имела температуру $T_{об.п.}$, при которой облицовочная смесь теряет прочность. Благодаря этому упрощается операция очистки кокиля и подготовки его к новой заливке. Для обеспечения заданной температуры на рабочую поверхность кокиля наносят разделительный подслои. Можно считать, что распределение температуры в подслое отвечает линейному закону. Тогда $\alpha_2 = \lambda'_{кр}/X'_{кр}$, где $\lambda'_{кр}$ и $X'_{кр}$ — теплопроводность и толщина подслоя (краски или анодного слоя на алюминиевом кокиле). Учитывая эту зависимость, с помощью формул (14)–(19) можно найти $X'_{кр}$, при которой облицовка теряет прочность. Однако такой способ является трудоемким.

В работе [25] приведен приближенный, но весьма простой метод определения искомой величины. Основан он на том, что температурное поле не только подслоя, но и облицовки приближенно описывается линейной зависимостью. Тогда

$$X'_{кр} = \frac{\lambda'_{кр}}{\lambda_{об}} \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{об.п.}} - 1 \right) X_{об}, \quad (21)$$

где T_1 и T_2 — температуры отливки и кокиля к моменту извлечения из него отливки.

Например, для отливки гильзы цилиндра автомобильного двигателя и алюминиевого анодированного кокиля, облицованного песчаной смесью на связующем ПК-104, $\lambda'_{кр} = 0,35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\lambda_{об} = 0,8 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $T_1 = 1220 \text{ К}$; $T_2 = 670 \text{ К}$; $T_{об.п.} = 770 \text{ К}$; $X_{об} = 4 \text{ мм}$. Подстановка этих величин в формулу (21) дает

$$X'_{кр} = \frac{0,35}{0,8} \left(\frac{1220 - 670}{1220 - 770} - 1 \right) 4 = 0,39 \text{ мм}.$$

При такой толщине анодной пленки вся облицовка выгорает и легко удаляется из кокиля. Температура T_2 поверхности кокиля, соприкасающейся с облицовкой, несколько выше начальной, что объясняется ее разогревом к моменту удаления отливки.

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

1. УПРАВЛЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ СТРОЕНИЕМ ОТЛИВОК

Скорость затвердевания как комплексный параметр процесса кристаллизации. Формулы (3), (4) и (17) выражают закон образования твердой фазы в отливке. Однако они не содержат никаких сведений относительно кристаллического строения затвердевшей корочки. В то же время известно, что размеры и форма кристаллов и неметаллических включений, а также характер их распределения в теле отливки определяют ее служебные свойства. Следовательно, установление закономерностей кристаллизации представляет собой задачу первостепенной важности.

Из результатов многочисленных экспериментальных исследований следует, что кристаллическое строение отливок и, следовательно, их служебные и технологические показатели определяются линейной скоростью затвердевания. Результаты этих исследований имеют и большое практическое значение: с их помощью можно определить скорость затвердевания, обеспечивающую заданное качество отливки, а затем с помощью расчетного аппарата, приведенного в гл. II, выбрать оптимальные параметры технологии.

Структурная диаграмма для чугунных отливок. На рис. 12 показана структурная диаграмма для чугуна, предложенная Г. Ф. Баландиным и Н. Н. Канунниковым. В ее основу положена известная диаграмма, предложенная Г. Ф. Баландиным в 1955 г. Коэффициент эвтектичности в уравнении конод (правая часть рис. 12) определяется по формуле

$$n = \frac{4,3 - C + \sqrt{(4,3 - C)^2 + 6Si}}{2Si}.$$

Формула для расчета степени эвтектичности S_e приведена на правой части рисунка.

На рис. 12 штриховыми линиями показаны два примера. В примере 1 определяется химический состав чугуна для отливки, затвердевающей со скоростью $u = d\xi/dt = 0,25 \text{ м/ч}$, если необходимо обеспечить перлитную металлическую основу. Поступая так, как показано на диаграмме стрелками, определяем, что при заданных параметрах чугун должен иметь $S_e = 0,7$. На конодной части находим, что это чугун с 3,25% С и 2,1% Si. Для получения структуры белого чугуна при той же скорости затвердевания необходимо снизить содержание Si до 0,9% (пример 2). Аналогично решаются обратные задачи: определение условий охлаждения для заданных структур и составов металла.

Известны и другие структурные диаграммы для чугунных отливок. По структурной диаграмме Г. Ф. Баландина, дополнен-

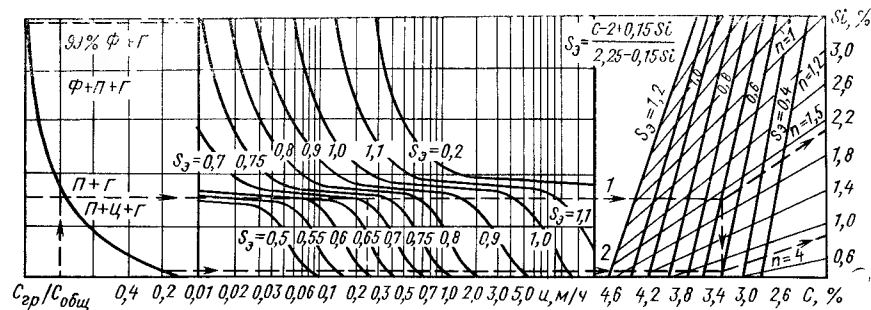


Рис. 12. Структурная диаграмма для чугуна (по Г. Ф. Баландину и Н. Н. Канунникову): $C_{\text{общ}}$ — общее количество углерода; $C_{\text{гр}}$ — количество углерода в виде графита

ной и уточненной А. И. Вейником на основе исследований Н. Г. Гиршовича, А. Я. Иоффе и А. Ф. Ланды, можно найти также механические свойства отливок [2.]. Эта диаграмма нашла применение при расчетах на ЭВМ технологии литья чугуна в кокиль. Поэтому она приведена в гл. VII.

Диаграмма Н. П. Дубинина устанавливает связь между скоростью затвердевания и основными структурами матрицы чугуна [52]. Необходимо подчеркнуть, что она построена специально для литья в кокиль.

Интересные исследования влияния u на характеристики графитных включений в чугунах проведены Б. Б. Гуляевым [48]. В частности установлено снижение по линейному закону отношения длины графитовых включений к их ширине с увеличением скорости затвердевания. Опыты проводили с чугуном, содержащим 3,45% С и 4,0% Si. Таким образом, с ростом u наблюдается сфероидизация графита. Экстраполируя экспериментальные данные, автор исследований приходит к выводу, что при u , равной примерно 7—8 см/мин, обеспечивается кристаллизация графита в шаровидной форме.

Зависимость между скоростью затвердевания и кристаллизацией стали. На рис. 13 приведены графические зависимости между скоростью затвердевания и механическими свойствами отливок и слитков из углеродистой стали по Б. Б. Гуляеву. Там же показано влияние u на число кристаллов N_1 . Как видно, с увеличением скорости затвердевания растут прочность, более заметно вязкость и особенно пластичность металла. Все это объясняется измельчением структуры стали (рис. 13, z и 14, b), а также уменьшением размеров неметаллических включений в ней (рис. 14, a). Аналогичный характер кривых на рис. 14, a и b следует из зависимости выделения неметаллических включений от особенностей кристаллизации металла.

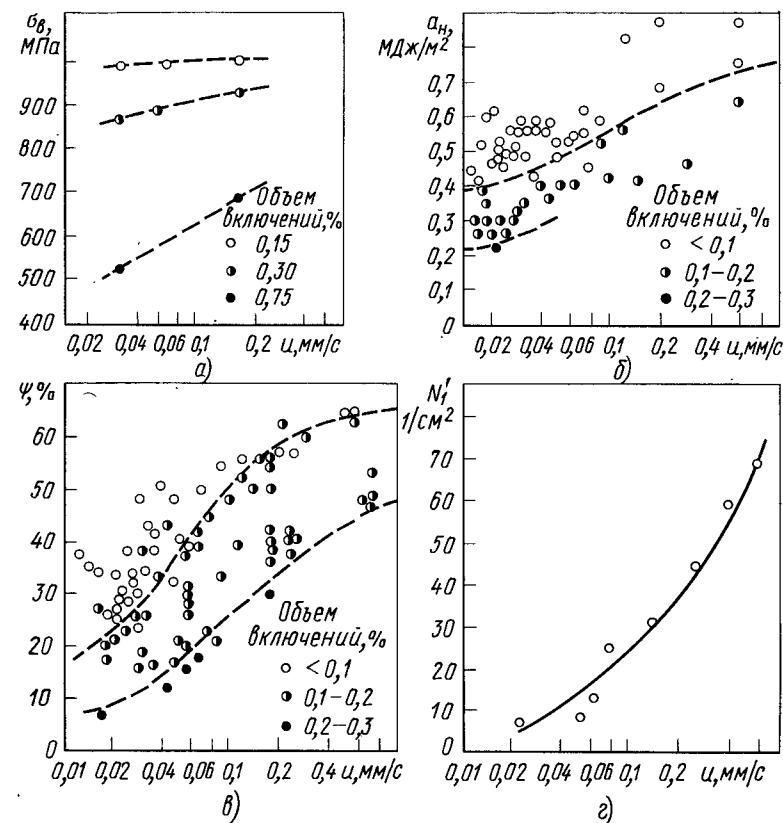


Рис. 13. Зависимость механических свойств и числа N_1 кристаллов в слитках стали 40Л от скорости затвердевания (по Б. Б. Гуляеву)

Данные, полученные Б. Б. Гуляевым, свидетельствуют, однако, о том, что размеры зерен во внутренних и наружных объемах цилиндрической стальной отливки оказываются неодинаковыми (в первом случае несколько мельче) при равных значениях скоростей затвердевания и что однозначная зависимость между размерами зерен и u наблюдается только для чистых металлов и эвтектических сплавов [48].

Зависимость между скоростью затвердевания и кристаллизацией цветных сплавов. Эксперименты с алюминий-кремниевыми сплавами показали, что с увеличением u размер зерен закономерно уменьшается. Для сплавов, затвердевающих в интервале температур, как в случае затвердевания стали, зерна в поверхностных слоях отливки несколько крупнее, чем в осевой зоне [48].

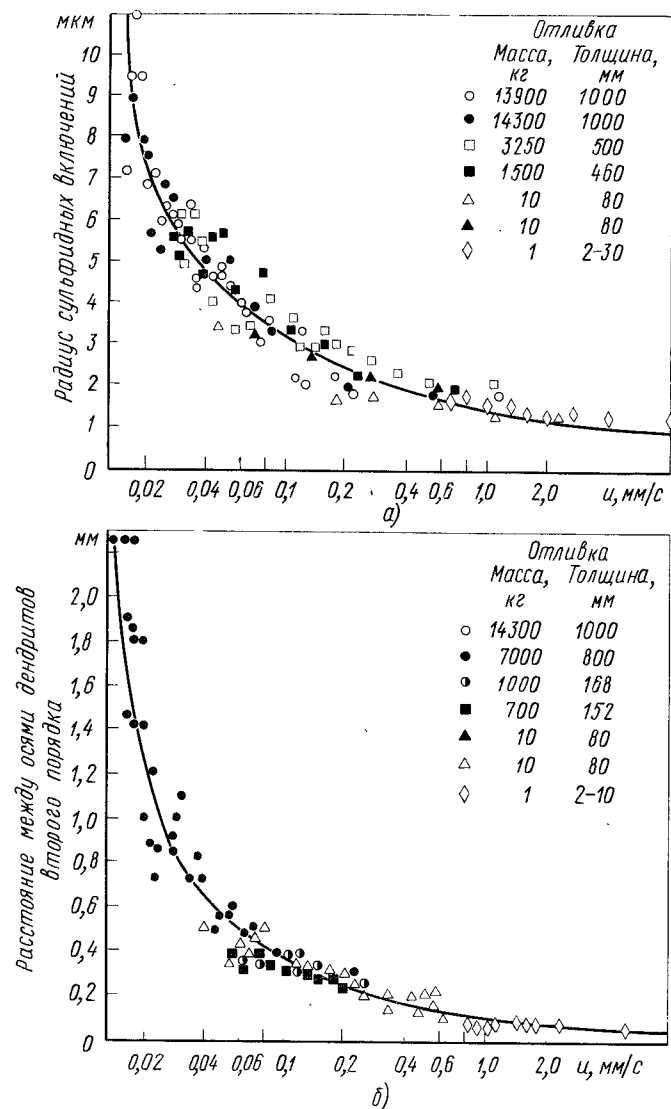


Рис. 14. Влияние скорости затвердевания на размер сульфидных включений (а) и расстояние между осями дендритов второго порядка (б) (по Б. Б. Гуляеву)

Детально исследовали особенности кристаллизации оловянистой бронзы Л. Ш. Зарецкий и В. Р. Ровкач. Опыты проводили с заливкой пластин из бронзы Бр ОЦС 5-5-5 ($T_{лик} = 1270$ К, $T_{сол} = 1120$ К) при температуре $T_{зал} = 1400 \div 1450$ К. Выявлено, что наиболее заметное повышение прочности и пластичности на-

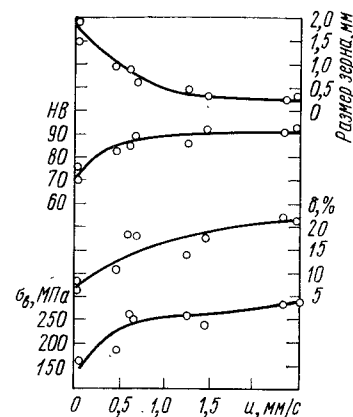


Рис. 15. Влияние скорости затвердевания на механические свойства и величину зерна отливок из бронзы Бр.ОЦС 5-5-5 (Л. Ш. Зарецкий, В. Р. Ровкач)

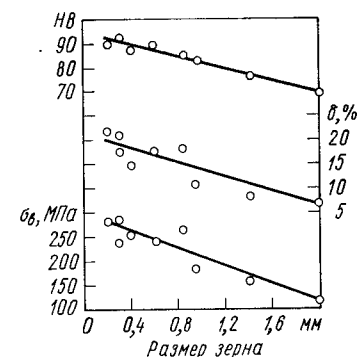


Рис. 16. Влияние величины зерна на механические свойства отливок из бронзы Бр ОЦС 5-5-5 (Л. Ш. Зарецкий, В. Р. Ровкач)

блюдается при увеличении скорости затвердевания до 1,0 мм/с. Последующее увеличение скорости влияет незначительно (рис. 15). Такой же характер влияния u и на размер зерна (верхняя кривая на рис. 15). Разница только в том, что с увеличением скорости теплоотвода размер зерна уменьшается. Связь механических свойств со структурой металла иллюстрируется кривыми на рис. 16.

Опытным путем установлено, что необходимые скорости затвердевания бронзы можно получить при литье в водоохлаждаемые алюминиевые кокили. Этот вывод получил подтверждение в производственных условиях на отливках не только из бронзы Бр ОЦС 5-5-5, но и из бронзы Бр ОФ 10-1.

2. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Параметры кристаллизации. В свете изложенного в предыдущем параграфе можно утверждать, что между кристаллизационными и тепловыми явлениями существует тесная связь. Однако экспериментальные данные в виде диаграмм скорость затвердевания — свойство мало что говорят о природе этой связи. Как показали исследования Н. Г. Гиришвича и Г. Ф. Баландина, процесс формирования отливки раскрывается наиболее полно, если его рассматривать на двух уровнях — тепловом и кинетическом [5, 6, 45]. Принципиальный вывод этих исследований в том, что в реальных условиях кинетика кристаллизации определяется не кристаллизационными параметрами, а теплоотводом, к которому эти параметры «приспосабливаются».

В реальных условиях кристаллизация протекает на затравках, число которых в единице объема равно N_3 , и на зародышах, образующихся со скоростью n ($\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$) в процессе кристаллизации. Параметр n зависит от переохлаждения ΔT расплава. Образование центров кристаллизации в отливках осуществляется на подложечных включениях, что исключает необходимость глубоких переохлаждений жидкого расплава относительно температур равновесного превращения. Подложечными включениями называется дисперсная, как правило, неметаллическая фаза, кристаллическая решетка которой близка к решетке кристаллизующегося вещества. Наиболее активные подложечные включения, т. е. такие, для которых работа образования зародышей равна нулю, воздействуют на процесс кристаллизации так же, как и мелкие кристаллы выделяющейся твердой фазы, и называются затравками. Количество затравочных включений по-видимому, невелико, так как в большинстве случаев с ускорением охлаждения сплава и увеличением переохлаждения количество кристаллических зерен в единице объема не остается постоянным, а возрастает. Это означает, что в процессе кристаллизации подключаются менее активные, чем затравки, подложечные включения. Таким образом, центры кристаллизации (зародыши кристаллов) в общем случае возникают на подложечных и на затравочных включениях.

Из теории кристаллизации известно, что зародышеобразование имеет инкубационный период: заметное увеличение n начинается при некоторой величине ΔT . При достаточно большом ΔT функция $n(\Delta T)$ проходит через максимум. Конкретный вид этой функции для различных условий приводится в работах [5, 45, 150].

Линейная скорость роста u граней кристаллов также определяется величиной переохлаждения. Чаще всего

$$u = K (\Delta T)^m, \quad (22)$$

где K — коэффициент роста; m — константа (равная единице для нормального роста кристаллов).

Кинетика объемной кристаллизации. Параметры $n(\Delta T)$ и $u(\Delta T)$ обуславливают кинетику объемной кристаллизации. Этот процесс описывается известным кинетическим уравнением А. Н. Колмогорова

$$V_1 = V_{\text{от}} (1 - e^{-\omega}), \quad (23)$$

которое пригодно для неизотермического процесса, если

$$\omega = \varphi \left[N_3 \left(\int_0^t u(\tau) d\tau \right)^3 + \int_0^t n(t') \left(\int_{t'}^t u(\tau) d\tau \right)^3 dt' \right], \quad (24)$$

где φ — коэффициент формы кристаллов [5].

В частном случае образования шаровидных кристаллов только на затравках ($\varphi = \frac{4}{3}\pi$; $n = 0$) объем затвердевшего металла

$$V_1 = V_{\text{от}} \left[1 - \exp \left(-\frac{4}{3} \pi r^3 N_3 \right) \right]. \quad (25)$$

При выводе формулы (25) учтено, что $u(\tau) d\tau = dr$, где r — радиус кристалла.

Закономерности объемной кристаллизации в кокиле. Для случая объемного затвердевания с постоянной скоростью на основании выражений (3') и (25) можно записать:

$$\frac{\alpha_1 \theta_{\text{кр}} F_1}{r_1 \rho_1} t = V_{\text{от}} \left[1 - \exp \left(-\frac{4}{3} \pi r^3 N_3 \right) \right],$$

тогда

$$r = \left[-\frac{3}{4\pi N_3} \ln \left(1 - \frac{\alpha_1 \theta_{\text{кр}} F_1 t}{r_1 \rho_1 V_{\text{от}}} \right) \right]^{1/3}. \quad (26)$$

Здесь сохранены обозначения гл. II.

Из зависимости (26) находят скорость кристаллизации и суммарную площадь поверхности свободной кристаллизации. Действительно, $u(t) = \frac{dr}{dt}$,

$$F \frac{dr}{dt} = \frac{dV_1}{dt} = \frac{\alpha_1 \theta_{\text{кр}} F_1}{r_1 \rho_1}.$$

Зная $u(t)$, из уравнения (22) нетрудно определить и ΔT .

Смысл перечисленных зависимостей поясняется расчетными кривыми, приведенными на рис. 17. Построены они для случая литья чугуна в кокиль при следующих условиях: $X_1 = 0,005$ м, $\alpha_1 = 742$ Вт/(м²·К), $\theta_{\text{кр}} = 1044$ град., $r_1 = 268 \cdot 10^3$ Дж/кг, $\rho_1 = 7200$ кг/м³, $N_3 = 0,2 \cdot 10^9$ м⁻³. Здесь в качестве T_c принята средняя калориметрическая температура, при этом α_1 определяли так, как рекомендовано в гл. II. Римские цифры у кривых соответствуют четырем различным значениям коэффициента нормального роста $K_{\text{нр}}$ кристаллов [коэффициента пропорциональности в выражении (22): I — $91,9 \cdot 10^{-6}$; II — $29,4 \cdot 10^{-6}$; III — $9,6 \cdot 10^{-6}$ и IV — $3,9 \cdot 10^{-6}$ м/(с·К)]. Крестиком обозначена точка перегиба кривых $\frac{dr}{dt}(t)$ и $F(t)$.

Кривые на нижнем графике описывают изменение переохлаждения во времени. Прямая линия на этом графике представляет собой участок термической кривой для стадии охлаждения расплава. Точки 1—4 пересечения этой линии с кривыми соответствуют начальному переохлаждению.

Для того чтобы процесс кристаллизации протекал в соответствии с расчетными кривыми к моменту пересечения прямой и

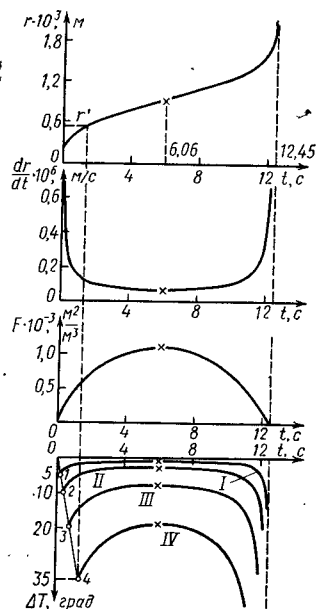


Рис. 17. Кинетические характеристики процесса неизоотермической объемной кристаллизации чугуна при литье в кокиль

кривой (на нижнем графике), должны существовать затравки, размеры которых легко найти по верхнему графику рис. 17. Для этого достаточно из точек 1, 2, 3, 4 провести вверх прямые параллельно оси ординат. При нормальном росте совпадение расчетной и фактической температурных кривых возможно, если в расплаве имеются затравки размером

$$r_0 = r' - \frac{K_{np} \Delta T_n^2}{2u_r},$$

где ΔT_n — переохлаждение в начальный момент времени; u_r — скорость охлаждения. Для рассмотренных четырех значений K_{np} оказалось, что r_0 равно 0,22; 0,28; 0,35 и 0,42 мм соответственно.

Приведенные на рис. 17 расчетные данные принципиально отражают наиболее характерные особенности объемного затвердевания чугуна отливки. В частности видно, что в начальный и конечный периоды кристаллизации, когда значения $F(t)$ мало для обеспечения изотермичности процесса, требуется наиболее высокая скорость линейного роста кристаллов. В изотермических условиях это требование не удовлетворяется и для его обеспечения необходимо переохлаждение жидкой фазы.

Особенности кристаллизации графита. На ранних этапах роста компактная форма графитных кристаллов является наиболее вероятной и обеспечивается термодинамическими факторами — межфазным натяжением. При дальнейшем росте графит может сохранять шаровидную форму либо разветвляться, что зависит от особенностей кристаллизации выступов — возмущений, находящихся на графитовых включениях.

Путем сопоставления величин диффузионного потока атомов углерода из пересыщенного раствора на вершину выступа и потока атомов с вершины к подножью выступа механизмом межфазной диффузии установлено существование минимального критического переохлаждения ΔT_k , необходимого для предотвращения роста выступов графита, т. е. получения графита компактной и шаровидной формы [132, 184]:

$$\Delta T_k = N \frac{D_o}{D_r} \sigma_m, \quad (27)$$

где N — константа; D_o/D_r — отношение коэффициентов объемной и граничной (на базисной плоскости графита) диффузии атомов углерода в железной основе; σ_m — межфазная удельная энергия. Очевидно, если фактическое переохлаждение расплава $\Delta T > \Delta T_k$, то графит кристаллизуется в компактной форме. Можно показать, что приближенно $\frac{D_o}{D_r} = \exp \left[-\frac{3}{2} \sigma_n (1 - \cos \Theta) \right]$, где σ_n — поверхностное натяжение чугуна; Θ — краевой угол смачивания расплавом монокристалла графита по базисной поверхности кристаллической решетки.

Сравнение полученных на основе данных работы [99] расчетных значений ΔT_k и соответствующих им величин ΔT в реальных условиях эвтектического превращения полностью подтверждает справедливость указанного неравенства.

Формула (27) позволяет объяснить благоприятные условия для получения шариков графита при литье в кокиль: речь идет о возможности достижения в этом случае больших величин ΔT . Эта формула позволяет также объяснить влияние поверхностно активных элементов (S, O₂, Mg и др.) на условия образования графита. Сера и кислород в определенных концентрациях снижают D_r , поэтому они являются антиглобулизаторами. Магний в количестве, которое применяют в производстве чугуна с шаровидным графитом, связывает S и O₂ и тем самым повышает D_r , т. е. снижает ΔT_k . Так, расчеты по формуле (27) показали, что в зависимости от состава чугуна ввод в него магния приводит к снижению ΔT_k на один-два порядка. Избыток магния уменьшает D_r и вызывает закономерное увеличение ΔT_k .

3. ВЛИЯНИЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЯ НА СКОРОСТЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В рассматриваемой ниже расчетной схеме последовательного затвердевания пластины (рис. 18) принято, что при переохлаждении расплава относительно температуры плавления скорость массопереноса по фронту превращения при заданной температуре, как при нормальном росте кристаллов, пропорциональна разности термодинамических потенциалов твердой и жидкой фаз. Тепловыделение на фронте кристаллизации пропорционально скорости массопереноса.

При построении расчетной модели принято также, что фронт затвердевания является гладким. Примерно такой фронт затвердевания имеют отливки из чистых металлов и эвтектических сплавов, кристаллизующихся с ячеистой либо столбчатой структурой. В частности, гладкий фронт кристаллизации с небольшой погрешностью можно принять при получении в металлических формах отбеленных чугунов с шаровидным графитом, ковкого чугуна и др.

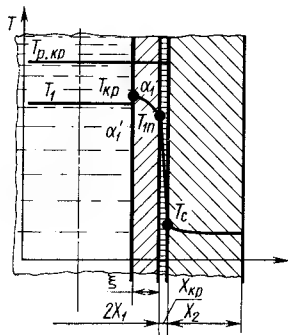


Рис. 18. Схема к расчету затвердевания плоских отливок с учетом переохлаждения

Если расплав переохлажден, то теплота, выделяющаяся на фронте кристаллизации, расходуется на нагрев остающегося жидкого расплава и на отвод в твердую корку. В свою очередь, отводимая в корку теплота в основном передается от корки в литейную форму и частично аккумулируется в корке (рис. 18). Теплота, передаваемая жидкому ядру, вызывает изменение его

температуры, которая практически не зависит от пространственной координаты. Связано это с конвективным перемешиванием.

С учетом изложенного, математической моделью последовательного затвердевания плоской отливки является следующая система уравнений:

$$\kappa (\theta_{p.кр} - \theta_{кр}) dt = [\alpha'_1 (\theta_{кр} - \theta'_1) + \alpha_1 \theta_{1п}] dt + c_1 \xi \rho_1 d\theta_{1ср}; \quad (28)$$

$$\alpha'_1 (\theta_{кр} - \theta'_1) dt = c'_1 \rho'_1 (X_1 - \xi) d\theta'_1; \quad (29)$$

$$\kappa (\theta_{p.кр} - \theta_{кр}) dt = r_1 \rho_1 d\xi, \quad (30)$$

где $\kappa = K_{пр} r_1 \rho_1$; $\theta_{p.кр}$ — температура равновесной кристаллизации, отсчитанная от температуры T_c массивного кокиля как от абсолютного нуля; θ'_1 , $\theta_{кр}$, $\theta_{1п}$ и $\theta_{1ср}$ — температура соответственно жидкости, корки на границе с жидкостью, корки по наружной поверхности и среднеинтегральная по корке с отсчетом от температуры формы; α_1 и α'_1 — коэффициенты теплопередачи от поверхности корки в литейную форму и жидкую фазу; $2X_1$ — толщина стенки отливки. В правых частях уравнений (28) и (29) не учтено изменение теплосодержания жидкого ядра и твердой корки при изменении толщины последней на $d\xi$. Связано это с тем, что указанные эффекты близки по абсолютной величине и в уравнения входят с противоположными знаками. Температуры $\theta_{кр}$ и $\theta_{1п}$ связаны между собой равенством [16]:

$$\theta_{кр} = \theta_{1п} \left(1 + \frac{\alpha_1 \xi}{n \lambda_1} \right), \quad (31)$$

где n — показатель параболы, описывающей распределение температуры в корке; λ_1 — коэффициент теплопроводности твердой фазы. В качестве внешней по отношению к отливке среды можно принять среду, температура которой равна средней калориметрической. Тогда α_1 выбирают так, как описано в гл. II.

Значительный интерес представляет момент начала возникновения корки. В уравнении (28) при $\xi \rightarrow 0$ последнее слагаемое правой части приобретает второй порядок малости и им можно

пренебречь. Тогда, учитывая, что $\theta_{1п} = \theta_{кр}$, легко получить соотношение

$$\theta_{кр.н} = \frac{\alpha'_1 \theta'_{1н} + \kappa \theta_{p.кр}}{\alpha'_1 + \kappa + \alpha_1}, \quad (32)$$

из которого видно, что в начальный момент времени в тончайшем слое закристаллизовавшейся корки появляется скачок температуры по отношению к температуре переохлажденного жидкого чугуна. Значение $\theta_{кр.н}$ было рассчитано по формуле (32) для различных величин α'_1 и κ при $\theta_{p.кр} = 897$ град.; $\theta'_{1н} = 877$ град. и $\alpha_1 = 848$ Вт/(м²·К), что соответствует охлаждению чугуновой отливки толщиной 0,03 м в кокиле с толщиной стенки $X_2 = 120$ мм при $T_c = 526$ К и $X_{кр} = 0,3$ мм. Результаты расчета $\Delta T_n = \theta_{кр.н} - \theta_{1н}$ представлены на графике рис. 19. (Индекс «н» относится к начальным величинам). Видно, что скачок температуры увеличивается с ростом значений κ и с уменьшением значений α'_1 . Оказалось, что при $\kappa = 37\,200$ $\Delta T_n = 0$.

Систему уравнений (28)–(30) исследовали численным способом с помощью ЭВМ «Наири-К». На рис. 20 представлены расчетные температурные кривые затвердевания чугуновых отливок с различной толщиной стенки $2X_1$, для $\Delta T_n = 20$ град. при $X_2 = 120$ мм и $X_{кр} = 0,3$ мм. Значения α'_1 определяли по величине критерия Нуссельта, заимствованной из работ Г. Ф. Баландина по изучению процессов кристаллизации стали. Значение $k = 1,6 \cdot 10^5$ Вт/(м²·К) принято ориентировочно. Одновременно на графиках представлены кривые затвердевания кокильных отливок, рассчитанные по формулам гл. II. Расчеты с учетом ΔT_n дают несколько меньшую общую длительность кристаллизации, однако это расхождение с увеличением толщины отливок уменьшается и не превышает 10%.

Из расчетных кривых (рис. 21 и 22) следует, что начальная скорость затвердевания кокильных чугуновых отливок существенно зависит от величины начального переохлаждения жидкого чугуна. Принципиальное значение имеет влияние толщины стенки отливки на величину переохлаждения. Сравнение кривых на рис. 20 и 21 показывает, что в случае переохлаждения начальная скорость затвердевания тонкостенной отливки значительно больше, чем массивной. Однако, когда процесс рассчитывают без учета переохлаждения, этот факт не обнаруживается (кривая 5). Таким образом, на основе исследования затвердевания с учетом переохлаждения можно объяснить повышенную склонность к отбелу тонкостенных чугуновых отливок (рис. 23).

Численным анализом системы уравнений (28)–(30) при различных значениях α'_1 и κ установлено следующее. С ростом значения α'_1 начальная скорость затвердевания значительно увеличивается, однако зона повышенных скоростей кристаллизации ограничивается практически тонкими поверхностными слоями отливки.

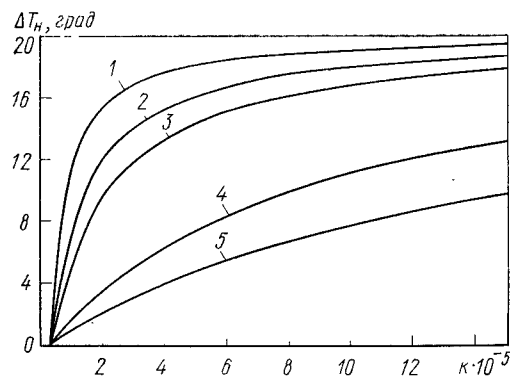


Рис. 19. Скачок температуры на границе корка—жидкий чугун в начальный момент кристаллизации при различных значениях коэффициента теплопередачи (α'_1) в зависимости от коэффициента массопереноса (κ):
 1 — $\alpha'_1 = 15\,000$; 2 — $\alpha'_1 = 75\,000$;
 3 — $\alpha'_1 = 150\,000$; 4 — $\alpha'_1 = 750\,000$;
 5 — $\alpha'_1 = 1\,500\,000$ Вт/(м²·К)

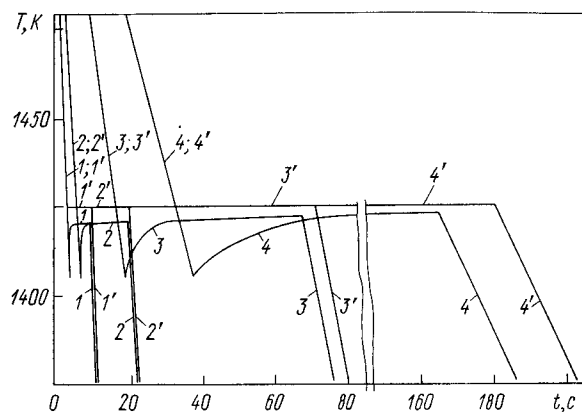


Рис. 20. Кривые изменения температуры жидкого ядра плоских чугунных отливок различных толщин при начальном переохлаждении на 20 град.:
 1 — $2X_1 = 5$; 2 — $2X_1 = 10$; 3 — $2X_1 = 30$; 4 — $2X_1 = 60$; 1—4 — с учетом переохлаждения; 1'—4' — без учета переохлаждения

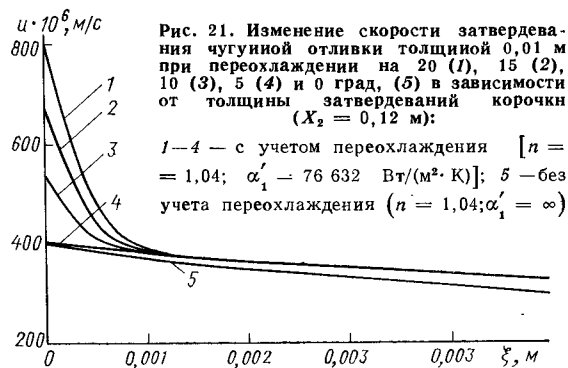


Рис. 21. Изменение скорости затвердевания чугунной отливки толщиной 0,01 м при переохлаждении на 20 (1), 15 (2), 10 (3), 5 (4) и 0 град. (5) в зависимости от толщины затвердеваний корочки ($X_2 = 0,12$ м):
 1—4 — с учетом переохлаждения [$n = 1,04$; $\alpha'_1 = 76\,632$ Вт/(м²·К)]; 5 — без учета переохлаждения ($n = 1,04$; $\alpha'_1 = \infty$)

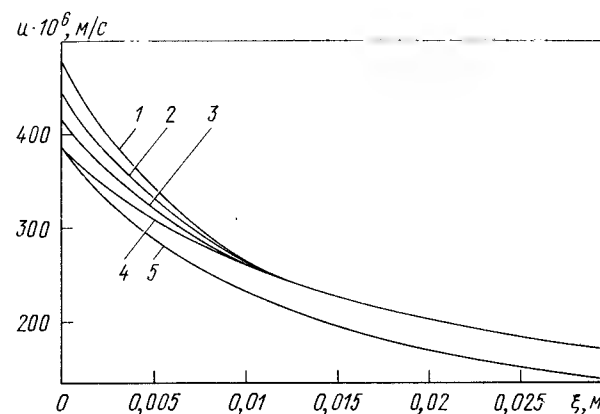
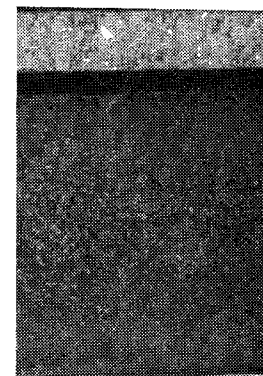


Рис. 22. Изменение скорости затвердевания чугунной отливки толщиной 0,06 м при переохлаждении на 20 (1), 15 (2), 10 (3), 5 (4) и 0 град. (5) в зависимости от толщины затвердевшей корочки ($X_2 = 0,12$ м):
 1 — 4 — с учетом переохлаждения ($n = 1,125$; $\alpha'_1 = 12772$ Вт/(м²·К)); 5 — без учета переохлаждения ($n = 1,125$; $\alpha'_1 = \infty$)

Рис. 23. Вид изломов чугунных (3,2% С и 3,3% Si) пластин, полученных в массивном окрашенном кокиле, ХЗ. Толщина пластин: сверху — 0,003 м; внизу — 0,020 м



Увеличение κ также приводит к росту начальной скорости затвердевания. Если величина $\kappa > \alpha'_1 / \left(\frac{\theta_{p.кр}}{\theta_{1n}} - 1 \right)$, то скорость затвердевания падает по мере нарастания твердой корочки, а температура жидкой фазы повышается. При перемене знака неравенства закономерности процесса имеют противоположный характер.

4. НАЧАЛЬНОЕ ПЕРЕОХЛАЖДЕНИЕ

Начальное переохлаждение может быть найдено с помощью приближенной аналитической зависимости, учитывающей скорость охлаждения металла, параметры гетерогенного зарождения и нормального роста кристаллов. Пренебрегая теплотой переохлажде-

ния в сравнении с теплотой кристаллизации, для объемного процесса из уравнения теплового баланса имеем

$$r_1 \rho_1 X_1 \frac{d\omega}{dt} = \alpha_1 (T_{p.кр} - T_c). \quad (33)$$

Здесь ω имеет тот же смысл, что и в формуле (23).

Значение $d\omega/dt$ для температуры, соответствующей начальному переохлаждению, можно рассчитать, используя приближение В. И. Данилова: $n(t') = n_0 (\Delta T - \Delta T_m)^v$, где n_0 — коэффициент, равный скорости зарождения центров кристаллизации в единице объема при переохлаждении на 1 град.; ΔT_m — интервал метастабильности металла либо сплава; v — коэффициент, значение которого может быть в пределах 2—3. При $v = 2$ и постоянной скорости изменения температуры u_T на основе уравнения (24) получено, что для затвердевания на затравках

$$\omega_3 = \frac{\pi}{6} N_3 (K_{np}^3 u_T^3 t^6 + 6K_{np}^2 u_T^2 r_0^2 t^4 + 12K_{np} u_T r_0^2 t^2 + 8r_0^3)$$

и для затвердевания на менее активных подложках

$$\omega_n = \frac{\pi}{6} n_0 K_{np}^3 u_T^3 \left(\frac{16}{315} u_T^2 t^9 - \frac{1}{4} u_T \Delta T_m t^8 + \frac{16}{35} \Delta T_m^2 t^7 - \frac{1}{3} \frac{\Delta T_m^3}{u_T} t^6 + \frac{1}{10} \frac{\Delta T_m^5}{u_T^3} t^4 - \frac{1}{35} \frac{\Delta T_m^7}{u_T^5} t^2 + \frac{1}{252} \frac{\Delta T_m^9}{u_T^7} \right).$$

В общем случае

$$\omega = \omega_3 + \omega_n. \quad (34)$$

Отсюда значение $d\omega/dt$ (а также $d\omega_3/dt$ и $d\omega_n/dt$) найти нетрудно. Выражения для ω_3 и ω_n относятся к росту трехмерных кристаллов.

С помощью приведенных формул для ω_3 и ω_n можно построить кривую, соответствующую левой части уравнения (33). Пересечение этой кривой с прямой линией, выраженной правой частью уравнения (33), позволяет найти интервал времени переохлаждения t , а затем и переохлаждение: $\Delta T_{кр.н} = u_T t$. Используя числовые данные, приведенные для отливки с $X_1 = 5$ мм в параграфе 3, а также значения $K_{np} = 3,9 \cdot 10^{-6} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-1}$, $\Delta T_m = 10$ град, $n_0 = 10^7 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{град}^{-2}$, $N_3 = 2 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, с помощью формул (33) и (34) определили максимальное переохлаждение чугуна при затвердевании с учетом влияния не только затравочных, но и менее активных подложечных включений (табл. 1).

В расчетах общего случая затвердевания значение r_0 учитывается только при определении ω_3 . Из табл. 1 видно, что с увеличением r_0 начальное значение переохлаждения $\Delta T_{кр.н}$ снижается. Менее активные подложечные включения благодаря их большому количеству заметно снижают величину начального переохлаждения.

Таблица 1

Результаты расчета начального переохлаждения чугуна, град

Характер затвердевания	Начальный радиус затравок; r_0 , м			
	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	0
На затравках	59,7	67,6	67,7	67,7
На менее активных подложечных включениях	—	—	—	47,8
На затравках и менее активных подложечных включениях	45,5	46,9	46,9	46,9

В расчетах, аналогичных приведенным, необходимо учитывать требование обобщенного Г. Ф. Баландиным критерия В. И. Родина: $V_1 [N_3 + N_t] \geq 200$, где N_t — число центров, возникших в единице объема на подложечных (менее активных, чем затравочные) включениях.

При последовательном затвердевании формирование кристаллизующейся корки происходит путем зарождения и роста кристаллов в тонком приповерхностном слое отливки, испытывающем максимальное переохлаждение. Можно принять, что переохлаждение металла в таком слое будет одинаковым с переохлаждением металла при объемном затвердевании, но при идентичном значении u_T . Таким образом, переохлаждение, при котором формируется начальная твердая корка отливки, принципиально может быть рассчитано методами, разработанными для объемного затвердевания. Перспективным для расчета формирования структуры чугуна с поверхностным отбелом является метод, учитывающий неравномерное квазистационарное распределение температуры по сечению отливки на стадии отвода теплоты перегрева.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА УСАДКИ

Под усадочными процессами понимают изменения размеров залитого в форму металла. Проявляются они как в объеме отливки, так и в объеме отдельного кристалла. Усадка играет важную роль в формировании свойств отливок. С ней связано возникновение в отливках пустот — усадочных раковин и пористости, деформации и напряжений [19—25, 48, 49, 169, 170], а также возникновение зазора между отливкой и формой. Газовый зазор оказывает существенное влияние на условия охлаждения отливки и нагрева кокиля [6, 19—21, 56].

Если изменение температуры тела не сопровождается фазовыми превращениями, то причиной усадки является изменение среднего расстояния между атомами. При охлаждении тел это расстояние уменьшается из-за сокращения ангармонической составляющей колебания атомов около их среднего положения [49].

Фазовые превращения сопровождаются скачкообразным изменением размеров и объема металла. Плотность ρ_1 жидкого металла чаще всего меньше плотности ρ_2 твердого металла. Однако для сурьмы, висмута и лития наблюдается обратная картина [49, 77].

Различные фазовые превращения, происходящие в твердом металле, обычно также сопровождаются изменениями объема. Примером могут служить превращения, возникающие в чугунах при температурах кристаллизации и создающие эффект предусадочного расширения чугуна. Этот эффект связан с распадом цементита и образованием свободного графита. При температурах около 1000 К у чугуна и стали происходит распад аустенита, что также связано с объемными изменениями.

Количественной мерой усадки служат коэффициенты линейной α_m или объемной β усадки (расширения). Как известно, $3\alpha_m = \beta$. Выбор одной из этих характеристик определяется соображениями удобства. В тех случаях, когда изменение объема металла локализуется в каких-то участках отливки, используют величину β . Ясно, что к таким случаям относятся усадка жидкого металла и затвердевание. Усадка в твердом состоянии более или менее изотропна. Поэтому она оценивается линейной величиной. Коэффициент объемной усадки при затвердевании

$$\beta_{кр} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1}.$$

Коэффициенты усадки металлов — основ важнейших литейных сплавов приведены в табл. 2.

Общая усадка сплава при литье в кокиль больше, чем при литье в песчаную форму. Объясняется это различием в скоростях

затвердевания: чем быстрее затвердевает отливка, тем меньше развивается в ней физическая неоднородность, влияющая на усадку [77].

Механизм усадочных явлений в отливке зависит от положения сплава на диаграмме состояния и интенсивности теплообмена в системе отливка—форма. Количественной характеристикой этого механизма служит критерий $\Delta T_{кр}/\delta T_1$, где $\Delta T_{кр}$ — интервал температур кристаллизации, δT_1 — перепад температур по толщине стенки отливки [21]. Наглядное обозначение величин, входящих в указанный критерий, показано на рис. 24. Условие последовательного затвердевания (рис. 24, а) металла имеет вид

$$\frac{\Delta T_{кр}}{\delta T_1} \ll 1. \quad (35)$$

Ясно, что данному критерию в полной мере удовлетворяют чистые металлы и эвтектические сплавы. Обычно ему удовлетворяют процессы формирования отливок в кокилях.

Таблица 2

Коэффициенты усадки [49]

Металл	$\beta_{ж}, 10^6, 1/град$	$\beta_{кр}$	$\alpha_m, 10^6, 1/град$
Алюминий	~40	0,066	21
Магний	~35	0,051	29
Медь	20	0,044	20
Железо	9	0,030	12
Титан	—	0,010	10

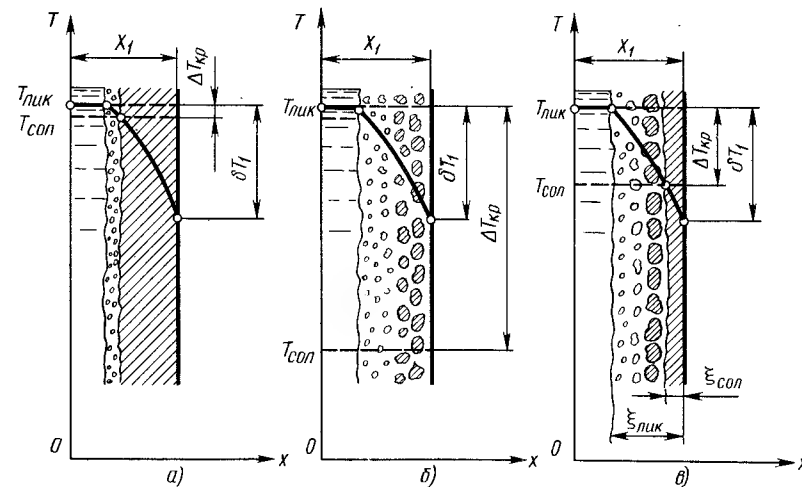


Рис. 24. Схемы различных процессов затвердевания:

а — последовательное затвердевание; б — объемное затвердевание; в — общий случай

Условие объемного затвердевания (рис. 24, б) формулируется следующим образом:

$$\frac{\Delta T_{кр}}{\delta T_1} \gg 1. \quad (36)$$

Критерий

$$\frac{\Delta T_{кр}}{\delta T_1} \simeq 1 \quad (37)$$

соответствует общему случаю затвердевания (рис. 24, в).

2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ

Если соблюдается условие (35), то механизм усадочных явлений характеризуется следующим. Сечение стенки затвердевающей отливки состоит в основном из двух зон: твердой корки и жидкого ядра. Ширина зоны, в которой металл находится в твердом и жидком состояниях, пренебрежимо мала. Изменение объема металла в связи с нарастанием твердой корочки, т. е. дефицит питания, компенсируется свободно текущим расплавом. При этом усадочная раковина локализуется в верхней (по заливке) части отливки. Так продолжается до тех пор, пока скорость подачи расплава к фронту затвердевания больше или равна скорости изменения дефицита питания. В противном случае формируется осевая пористость.

Из условия равенства скоростей подачи расплава и изменения дефицита питания получена формула для размеров зоны осевой пористости плоской отливки [49]

$$\Delta \xi_{пор} = \sqrt[3]{\frac{3\beta_{кр}\mu K^2 H^2}{2\rho X_1}}, \quad (38)$$

где $\Delta \xi_{пор}$ — половина ширины зоны осевой пористости; μ — коэффициент динамической вязкости; K — константа затвердевания; H — высота отливки и p — давление. Движение питающего металла происходит под действием атмосферного давления p_a гидростатического напора gr_1H , поэтому $p = p_a + gr_1H$. При выводе формулы (38) сопротивление движению жидкого металла учитывалось по закону течения ньютоновской жидкости, а нарастание твердой корочки — по закону квадратного корня (физический смысл закона квадратного корня рассмотрен в монографии [20]). Фактические размеры пористой зоны должны быть меньше, чем найденные по приведенной формуле: в конечный период процесса дефицит питания в большей или меньшей степени восполняется фильтрацией жидкой фазы.

Из выражения (38) следует, что при увеличении скорости затвердевания осевая пористость возрастает. В частности, при

удвоении скорости затвердевания (в случае перехода от песчаной формы к металлической) размер пористой зоны возрастает в 1,6 раза. Увеличению размеров пористой зоны способствуют также рост высоты отливки и утонение ее стенки [49].

3. ОБЪЕМНОЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЕ

Особенности процесса. При объемном затвердевании отливки [условие (36)] механизм усадочных явлений сильно отличается от рассмотренного выше. В данном случае условия питания отливки одинаковы во всем ее объеме. В начальной стадии процесса — вблизи температуры ликвидуса $T_{лик}$ — движение жидкой фазы осуществляется свободно. Течение сплава с некоторым количеством кристаллов носит структурный характер. При этом средняя часть потока (ядро) движется как единое целое [49]. Так продолжается до тех пор, пока относительное количество твердой фазы не достигнет некоторой величины. По данным работы [21] кристаллы образуют неподвижный скелет, когда количество выпавшей фазы примерно составляет 30—40%. По другим данным эта величина равна 25—30%.

С момента образования неподвижной сетки кристаллов питание отливки определяется закономерностями фильтрации жидкой фазы. Фильтрация металла прекращается при выпадении около 80% твердой фазы. При этом ячейки с жидким металлом разобщаются и питание отливки в обычных условиях становится невозможным.

Изменение объема затвердевшей отливки или ее элемента в условиях объемного процесса может быть охарактеризовано функцией одной переменной — времени. Графическое изображение одной из таких функций, а именно скорости w изменения дефицита питания, приведено в виде кривой I на рис. 25. Вид этой кривой зависит от конкретных условий затвердевания отливки, что видно из приведенных ниже расчетных формул. На кривой имеется ряд характерных точек. В точке, соответствующей абсциссе t'_{30} , происходит схватывание кристаллов в неподвижную сетку. С момента t'_{30} питание отливки может осуществляться только путем фильтрации жидкой фазы через эту сетку. В момент t'_{30} разросшиеся кристаллы разобщают находящуюся между ними жидкую фазу; фильтрация, обеспечивающая питание, прекращается. В момент t_{30} происходит полное затвердевание отливки. Для того чтобы в отливке не образовалось пустот, в нее за время Δt должен войти объем расплава (рис. 25, а):

$$\Delta W = w \Delta t.$$

Здесь ΔW — дефицит питания в интервале времени Δt . Очевидно полный дефицит объема W_0 металла в отливке равен площади над кривой I .

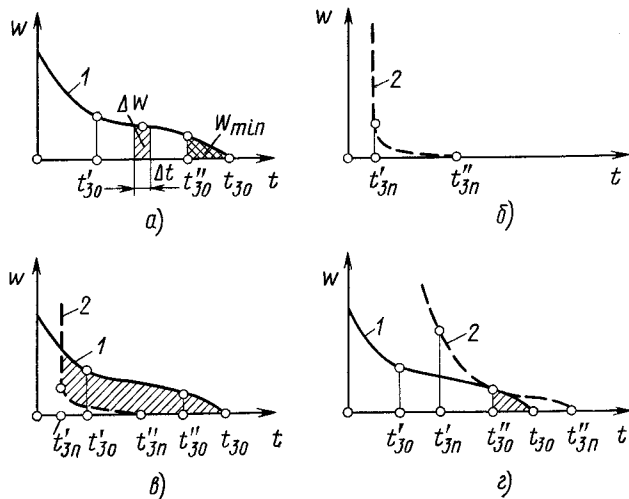


Рис. 25. Диаграмма питания отливки:

1 — потребный для питания отливки расход металла; 2 — возможный расход металла

В интервале $\Delta t'' = t_{30}'' - t_{30}'$ отливка затвердевает в условиях, когда жидкая фаза находится в разобщенных ячейках. При этом питание этих ячеек отсутствует. Следовательно, площадь над кривой 1 от момента t_{30}' до момента t_{30}'' равна тому дефициту питания $W_{\min}$, который не восполняется питанием, т. е. эта площадь соответствует неизбежному объему усадочных дефектов. Устранить этот объем частично или полностью можно, например, путем применения давления, способного интенсифицировать фильтрацию жидкой фазы или разрушить ячеистую структуру твердых кристаллов.

Питающий элемент отливки (включая питатель или перешеек прибыли) должен пропустить через себя объем жидкого металла, равный $W_0 - W_{\min}$. Объем этот необходим для предотвращения возникновения пустот в питаемом узле отливки (или отливки в целом). При расчетах условий, обеспечивающих восполнение дефицита питания фильтрацией, величиной $W_{\min}$ можно пренебречь. В этом случае, очевидно, возникает некоторый технологический запас питания.

Диаграмма питания отливки. Кривая 2 на рис. 25, б характеризует изменение объемного расхода жидкого металла через питающий элемент. Точка $t_{3п}'$ соответствует моменту прекращения обычного течения расплава (т. е. началу процесса фильтрации), а точка $t_{3п}''$ — прекращению фильтрации и образованию разобщенных ячеек жидкой фазы. Площадь под кривой в интервале $t_{3п}' - t_{3п}''$ соответствует тому объему жидкой фазы, который может быть подан в питаемый узел.

Наложение кривых 1 и 2 позволяет получить полную картину питания отливки при условии (36). В зависимости от относительного положения этих кривых отливка будет иметь тот или иной объем усадочных дефектов. График, на котором сопоставляются кривые 1 и 2, называется диаграммой питания отливки [21]. На рис. 25, в показано совмещение кривых, когда соотношение между необходимым для питания расходом жидкой фазы и расходом жидкого металла через питающий элемент является неудовлетворительным: объем усадочных дефектов соответствует заштрихованной области графика. Расположение кривых на рис. 25, г соответствует таким условиям, когда питание отливки обеспечивается в течение всего процесса затвердевания, вплоть до точки t_{30}'' . При этом объем усадочных дефектов оказывается минимальным ($W_{\min}$), а плотность — максимально возможной.

Расчетные формулы. Диаграмма питания позволяет в каждом отдельном случае определить объем усадочных дефектов в отливке и найти ее фактическую плотность. С помощью диаграммы, а также приведенных ниже формул можно рассчитать параметры технологии, обеспечивающие заданную плотность литого металла.

Дефицит питания W как функцию времени находят по формуле

$$W = \frac{\rho_1 - \rho_1'}{\rho_1} V_1 = \beta_{кр} V_1. \quad (39)$$

Объем затвердевшего металла V_1 при литье в обычные и облицованные кокили определяют по формулам гл. II. Очевидно

$$w = \frac{dW}{dt} = \beta_{кр} \frac{dV_1}{dt}. \quad (40)$$

Таким образом, по формуле (40) рассчитывают кривую 1 на рис. 25.

Кривую 2 на рис. 25 рассчитывают на основе уравнения закона ламинарной фильтрации (Дарси):

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{K}{g\rho_1'} \frac{\partial p}{\partial x} F_{сеч}, \quad (41)$$

где K — коэффициент фильтрации; $\partial p / \partial x$ — градиент давления; $F_{сеч}$ — сечение потока фильтрации. Как показано в работе [21],

$$K = A_4 (t_{3п}' - t)^{n_4}. \quad (42)$$

В этом выражении A_4 и n_4 — коэффициенты. Для практических расчетов можно принять $A_4 = 6 \cdot 10^{-8}$ м/с² и $n_4 = 1$. Интегрирование уравнения (41) с учетом (42) дает

$$W = \frac{A_4 F_{сеч}}{(n_4 + 1) g\rho_1'} \frac{\partial p}{\partial x} [(t_{3п}' - t_{3п}')^{n_4+1} - (t_{3п}' - t)^{n_4+1}]. \quad (43)$$

В момент окончания фильтрации ($t = t_{3п}''$)

$$W = \frac{A_4 F_{сеч}}{(n_4 + 1) g\rho_1'} \frac{\partial p}{\partial x} (t_{3п}' - t_{3п}')^{n_4+1}, \quad (43')$$

что соответствует количеству жидкой фазы, перетекающей через питающий элемент. При литье в кокиль t'_3 и t''_3 находят с помощью формул гл. II. Если питающий элемент оформляется песчаной вставкой, то для вычисления этих величин можно использовать формулы работы [20].

Приведенные выше формулы позволяют количественно оценить условия подпитки отливки путем фильтрации и оценить при этом влияние таких факторов, как площадь сечения и длина канала, по которому подводится расплав к питаемому узлу, давление, вследствие которого перемещается расплав, и интенсивность теплообмена между отливкой и формой. Тепловая сторона процесса отражается на величинах $t'_{3п}$ и $t''_{3п}$.

4. ОБЩИЙ СЛУЧАЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ

Механизм усадочных процессов при условии (37) характеризуется наибольшей сложностью. При этом условии в стенке отливки возникают три зоны: затвердевшая корочка толщиной $\xi_{\text{сол}}$, слой твердо-жидкого состояния шириной $\Delta\xi_{\text{кр}} = \xi_{\text{лик}} - \xi_{\text{сол}}$ (двухфазная переходная зона) и жидкое ядро шириной $X_1 - \xi_{\text{лик}}$ (см. рис. 24, в). В переходной зоне возникают фильтрационные процессы, аналогичные рассмотренным выше. Их особенность только в том, что коэффициент фильтрации зависит от пространственной координаты: вблизи фронта ликвидуса K достигает максимальной величины, а вблизи фронта солидуса $K \rightarrow 0$.

Для решения задачи о питании отливки в рассматриваемом случае приходится учитывать поле значений коэффициента K , что сильно усложняет расчет. В работе [21] приведено приближенное решение задачи о ширине пористой зоны в плоской отливке.

Идея расчета иллюстрируется схемой на рис. 26. При наличии переходной зоны после достижения в осевой части отливки температуры T'_u , соответствующей моменту t'_3 схватывания кристаллов, поступле-

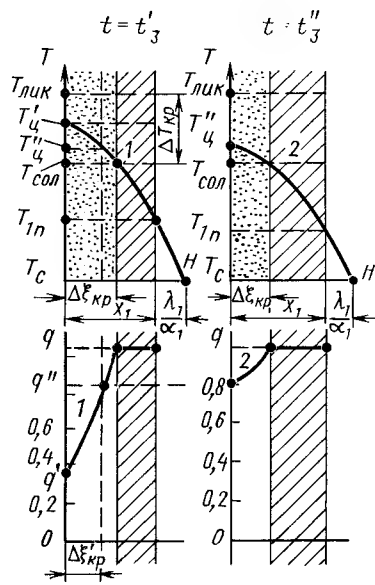


Рис. 26. Схема распределения температуры и количества твердой фазы в сечении отливки:

1 — кривые для момента t'_3 ; 2 — кривые для момента t''_3

ние жидкой фазы из прибыли резко уменьшается. С этого момента затвердевание отливки происходит в условиях, когда жидкая фаза фильтруется из осевой зоны отливки в периферийную (вдоль радиуса). При этом осевая зона служит как бы прибылью для периферийной.

Начальная ширина $\Delta\xi'_{\text{кр}}$ переходной зоны, соответствующая моменту t'_3 , определяется температурами T'_u и T''_u ; при температуре T''_u прекращается фильтрация: эта температура несколько выше $T_{\text{сол}}$ (рис. 26). Величину $\Delta\xi'_{\text{кр}}$ находят по формуле [20]

$$\Delta\xi'_{\text{кр}} = X_1 \sqrt[n]{\frac{T'_u - T''_u}{T'_u - T_c} \left(1 + \frac{n}{Bi_1}\right)}, \quad (44)$$

где n — показатель степени параболы, описывающей температурное поле отливки; T_c — температура окружающей среды.

Вследствие фильтрации жидкой фазы вдоль радиуса ширина пористой зоны $\Delta\xi_{\text{пор}} < \Delta\xi'_{\text{кр}}$. Можно показать, что

$$\Delta\xi_{\text{пор}} = \Delta\xi'_{\text{кр}} \frac{\rho_1 - \rho'_1}{\rho_1}. \quad (45)$$

Расчетные температуры T'_u и T''_u , входящие в формулу (45), определяются количеством твердой фазы, при выпадении которой происходит схватывание кристаллов и разобшение жидких ячеек (величины q' и q'' соответственно на рис. 26). Диаграммы состояния позволяют определить T'_u и T''_u по известным q' и q'' . Численные значения последних были указаны ранее. Для приближенной оценки $\Delta\xi_{\text{пор}}$ можно принять в формуле (44) $T'_u = T_{\text{лик}}$ и $T''_u = T_{\text{сол}}$.

5. ОСНОВЫ ВЫБОРА ПИТАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Выбор прибыли должен удовлетворять очевидному условию: в любой момент времени объем жидкой фазы в прибыли должен быть не меньше, чем дефицит питания W (полный дефицит питания определяется по формуле (39), если принять $V_1 = V_{\text{от}}$). Данное условие является необходимым, но не достаточным. Оно учитывает только теплофизическую сторону процесса питания. При выборе оптимальной прибыли следует учитывать также гидродинамические факторы.

Выбор прибыли по необходимому условию сводится к построению диаграммы, аналогичной диаграмме питания (рис. 27). По формуле (39) и формулам для определения V_1 , приведенным в гл. II, находим кривую 1. Далее определяем кривую 2 изменения объема W_n жидкой фазы в прибыли. Для этой цели используем те же формулы, что и для расчетов затвердевания отливки. Понятно, что выбор расчетных формул определяется условиями охлаждения прибыли (обычный или облицованный кокиль, песчаный стер-

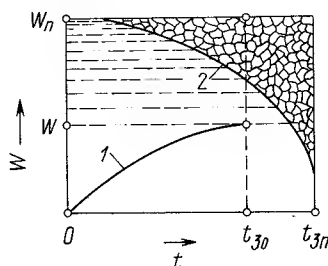


Рис. 27. Диаграмма питания отливки из прибыли

жень и т. д.). Все известные методы выбора прибыли при литье в кокиль, как и при литье в другие формы, учитывают по существу необходимое условие питания. Технологические приемы такого выбора при производстве в кокилях отливок

из различных сплавов рассматриваются в соответствующих разделах настоящей монографии.

Одним из показателей эффективности действия прибыли является глубина (дистанция) питания. Дистанция действия прибыли растет по мере увеличения критерия направленности затвердевания. Последний представляет собой тангенс угла клиновидного не затвердевшего канала. При малых значениях критерия свободное течение расплава заменяется фильтрацией. Для последнего случая дистанцию действия прибыли можно рассчитать на основании следующих соображений. Дефицит питания пропитываемого прибылью узла

$$W_L = (q'' - q') F_{\text{сеч}} L \frac{\rho_1 - \rho'_1}{\rho_1}, \quad (46)$$

где L — зона действия прибыли. Из теории фильтрации несжимаемой жидкости известно, что $\frac{\partial p}{\partial x} = \text{const}$. Следовательно, $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\Delta p}{L}$. Учитывая это, из формул (43') и (46) находим

$$L = \sqrt{\frac{A_4 \Delta p (t_3'' - t_3')^{n_4+1}}{(n_4+1)(q'' - q')g(\rho_1 - \rho'_1)}}. \quad (47)$$

Выражение (47) справедливо для любых литейных форм, если выполняется условие (36). Различие заключается только в методах нахождения t_3' и t_3'' .

Для приближенных расчетов в выражении (47) можно принять $q'' = 1$, $q' = 0$, $t_3'' = t_3$, $t_3' = 0$ и $n_4 = 1$.

При этих условиях

$$L = t_3 \sqrt{\frac{A_4 \Delta p}{2g(\rho_1 - \rho'_1)}}. \quad (47')$$

Как видно, чем длительнее процесс затвердевания отливки, тем больше дистанция действия прибыли. В то же время увеличение давления в прибыли менее эффективно: L пропорционально Δp в степени $1/2$.

6. ОБРАЗОВАНИЕ ЗАЗОРА МЕЖДУ ОТЛИВКОЙ И КОКИЛЕМ

Общая характеристика процесса. С усадкой металла связано появление газового зазора (прослойки) X_r между отливкой и кокилем. Величина X_r зависит также от деформации формы. Изучение закономерностей изменения величины X_r относится к числу чрезвычайно важных практических задач. Как указывалось, с появлением зазора резко изменяется величина коэффициента теплоотдачи от отливки к форме. Это видно из расчетных формул гл. II, причем во многих случаях термическое сопротивление, создаваемое зазором, становится определяющим фактором термических условий литья. Тогда управление процессом формирования отливки путем изменения толщины покрытия кокиля оказывается неэффективным. Действительно, λ_r примерно на порядок меньше, чем $\lambda_{кр}$. Это означает, что при $X_r = 0,5$ мм создается такое же термическое сопротивление, как и при покрытии кокиля толщиной 5 мм. Ясно, что в процессах литья в обычные кокили такая толщина покрытия не достижима. Очевидно в рассматриваемых условиях невозможно повысить интенсивность охлаждения отливки путем уменьшения $X_{кр}$. Так, экспериментально установлено, что при уменьшении $X_{кр}$ и, следовательно, повышении интенсивности нагрева плоской стенки формы увеличивается ее коробление, что приводит к росту X_r [56]. Таким образом, эффект, от уменьшения $X_{кр}$ снимается ростом X_r .

Известны процессы литья, в которых зазор создают искусственно, например для получения тонкостенных чугуновых отливок без отбела. Но и в этих случаях изучение закономерностей самопроизвольного образования зазора — важная практическая задача: кокили можно раскрывать после того, как затвердевшая корочка отливки начинает отходить от формы.

Линейные размеры отливки начинают изменяться после образования сплошного твердого скелета. Согласно исследованиям А. А. Бочвара и В. И. Добаткина, в сплавах Al—Mg, Mg—Al и Pb—Sn линейная усадка проявляется, когда в затвердевшем объеме остается 20—45% жидкой фазы. Последующее изменение размеров отливки связано с понижением ее температуры в процессе охлаждения в твердом состоянии.

На кинетику изменения размеров отливки влияет большое число факторов: состав металла, интенсивность теплообмена, размеры отливки и т. д. Влияние этих факторов было объектом экспериментальных исследований [16, 19]. Результаты некоторых из них приведены ниже.

На рис. 28 изображены кривые изменения во времени газового зазора X_r между отливкой размером $60 \times 60 \times 155$ мм и чугуновым кокилем. Толщина стенки кокиля $X_2 = 30$ мм; $M_2 = 19,73$ кг;

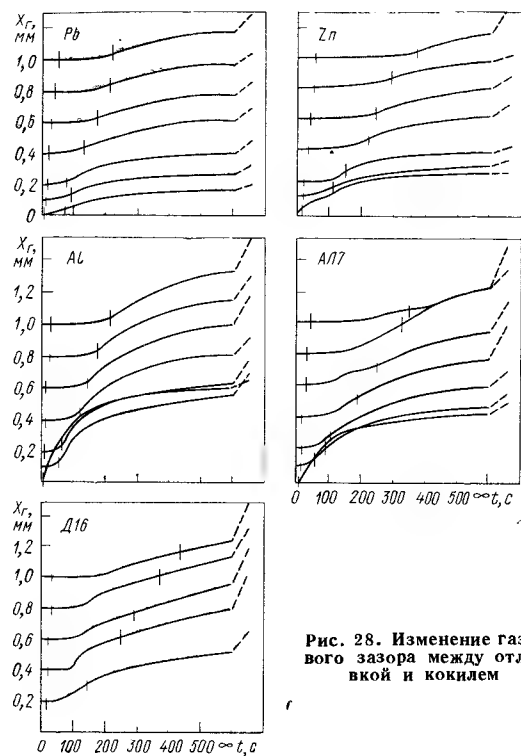


Рис. 28. Изменение газового зазора между отливкой и кокилем

$T_{2н} = 370$ К; состав краски в % по массе: 12,4 мела тонкого помола, 1,7 коллоидального графита, 3,3 жидкого стекла, 82,6 воды. Зазор измеряли между боковыми гранями отливки и кокилем с двух противоположных сторон. На графиках приведены средние значения зазора (отливка обычно усаживается в разные стороны неодинаково). Устройство, с помощью которого измеряли величину газового зазора, описано в работах [16 и 19]. Были испытаны различные металлы и сплавы. Сплав Д16 (дуралюмин) имеет следующий состав, %: 4 Cu; 1,5 Mg; 0,5 Mn; Al—остальное ($T_{сол} = 779$ К; $T_{лик} = 921$ К).

Из рисунка видно, что у различных металлов усадка неодинакова. Наименьшей усадкой обладает свинец, наибольшей — алюминий и его сплавы. С увеличением начальной интенсивности теплообмена (уменьшением толщины слоя краски) величина газового зазора возрастает. Это объясняется влиянием термических напряжений, которые приводят к необратимым деформациям отливки (с ростом интенсивности теплообмена увеличиваются перепады температуры, а с ними и термические напряжения).

При уменьшении интенсивности теплообмена (увеличении $X_{кр}$) снижаются абсолютные значения X_r и еще больше — его относительные значения. Это объясняется ростом термического сопротивления слоя краски. При достаточно больших $X_{кр}$ влиянием газового зазора можно вообще пренебречь.

На рис. 28 на каждом графике отмечены значения газового зазора, относящиеся к моменту полного охлаждения отливки и кокиля ($t = \infty$). Эти данные позволяют судить о полной усадке отливки. При этом не следует упускать из виду, что при заливке кокиль имеет начальную температуру $T_{2н} = 370$ К, а при $t = \infty$ он охлаждается до температуры окружающей среды $T_c = 290$ К. Изменение средней температуры кокиля на 80 град. сопровождается сокращением его размеров и уменьшением газового зазора на величину 0,026 мм. Полное представление об усадке отливки, расширении и усадке кокиля и о влиянии на этот процесс температурного поля системы дает комплексная диаграмма охлаждения алюминия в форме, приведенная на рис. 29. Сопоставление этой диаграммы с кривыми, показанными на рис. 28, позволяет установить, какой характер имеет усадка металла в различных стадиях процесса.

Точный расчет газового зазора, образующегося между отливкой и кокилем, крайне затруднителен ввиду наличия необратимых деформаций металла. В работе [21] выведены простейшие формулы для расчета X_r . Установлено, что величиной газового зазора в первой и второй стадиях процесса (течение металла и отвод теплоты перегрева) можно пренебречь, так как жидкий металл очень хорошо прилегает к стенке формы (к поверхности кокильной краски). При этом коэффициент теплопередачи к кокилю определяется простейшей формулой (см. гл. II): $\alpha_1 = \lambda_{кр}/X_{кр}$.

Задача об определении величины газового зазора имеет смысл только для третьей (затвердевание металла) и четвертой (охлаждение полностью затвердевшей отливки в форме) стадий процесса.

Весьма сильно изменяется величина X_r при тонкостенном кокиле, охлаждаемом в естественных условиях на воздухе, когда коэффициент α_3 не очень велик. При этом кокиль разогревается до очень высокой температуры (высока средняя калориметрическая температура системы T_k) и сильно расширяется. Роль кокиля в образовании газового зазора уменьшается с ростом X_2 . Очень массивный кокиль слабо прогревается и труднее деформируется, поэтому его влияние на величину X_r незначительно.

Влияние средних температур отливки и кокиля. При решении задачи о теоретическом определении величины X_r в первом грубом приближении предполагаем, что процесс усадки (или расширения) отливки и расширения (или усадки) кокиля обусловлен только изменением средних объемных температур $T_{1ср}$ и $T_{2ср}$. Влиянием термических напряжений, приводящих к необратимым

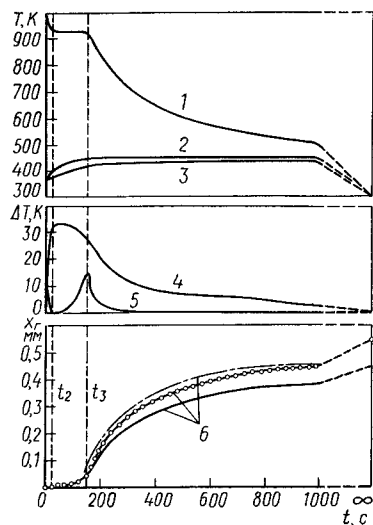


Рис. 29. Комплексная диаграмма охлаждения алюминиевой отливки:

1 — температура центра отливки; 2 и 3 — температуры внутренней и наружной поверхности формы; 4 — перепад температуры в сечении формы; 5 — перепад температуры между центром отливки и серединой боковой грани; 6 — газовый зазор между отливкой и формой

деформациям отливки и кокиля, пренебрегаем. В этом случае приближенная расчетная формула для определения величины газовой прослойки в процессе затвердевания отливки (третья стадия) имеет вид

$$X_r = X'_{1r} + X_{2r}, \quad (48)$$

где X'_{1r} — толщина газовой прослойки, образующейся из-за усадки (или расширения) твердой корки в период затвердевания

отливки, м; X_{2r} — толщина газовой прослойки, возникающей из-за изменения размеров кокиля, м. Величина X'_{1r} может иметь положительный или отрицательный знак. Отрицательной она бывает, например, в условиях предусадочного расширения металла. Величина X_{2r} также может быть как положительной (при разогреве кокиля), так и отрицательной (при охлаждении кокиля).

По выражению, аналогичному (48), рассчитывают величину газовой прослойки на четвертой стадии (охлаждение полностью затвердевшего металла). При этом X'_{1r} заменяют величиной X''_{1r} — прослойкой, образующейся вследствие термической усадки отливки в четвертой стадии процесса.

Формулы для определения величин, входящих в выражения (48), приведены в монографии [21]. Результаты расчетов с их помощью представлены на рис. 29 в виде сплошной кривой 6; точки соответствуют экспериментальным данным. Разница между опытными и расчетными значениями X_r в данном конкретном примере получилась весьма незначительной. Как и следовало ожидать, опытные точки располагаются выше расчетных, что свидетельствует о влиянии термической деформации кокиля.

Влияние деформации плоского кокиля. В работе [126] предложен метод расчета составляющей газовой зазора X_{2r} , которая образуется вследствие упругой деформации (коробления) плоского кокиля. Кокиль рассматривается как пластина длиной L_1 и шириной L_2 , изгибаемая равномерно распределенным по контуру температурным моментом M . Суть метода в следующем.

Зазор между отливкой и кокилем в каждой точке равен разности между соответствующими значениями стрелы прогиба ко-

киля f_1 в момент, когда затвердевшая корочка, не деформируясь, может выдержать давление жидкого ядра отливки, и f_2 в рассматриваемый момент времени. Как следует из экспериментальных данных (см. рис. 28), в первом приближении этот момент времени соответствует $1/2 (t_2 + t_3)$. Так как теплообмен между отливкой и кокилем определяется не значениями газового зазора в каждой точке, а средней величиной по всей контактной поверхности, то

$$X'_{2r} = f_{1cp} - f_{2cp}. \quad (49)$$

Величины f_{cp} находят по формуле

$$f_{cp} = \frac{M(1-\nu)}{EX_2^3} (L_1^2 + L_2^2), \quad (50)$$

где ν — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости первого рода. При расчете f_{1cp} в формулу (50) подставляют значения M к началу образования зазора, а при расчете f_{2cp} — к интересующему нас моменту времени.

Если для определения температурного поля кокиля используют среднюю калориметрическую температуру системы отливка — кокиль и температурное поле аппроксимируется параболой второго порядка, то при глубине прогретого слоя меньше X_2 (первый этап прогрева)

$$M = \frac{\alpha_m E}{1-\nu} \theta_{k0} \text{Bi}_2 X_2^2 \frac{Fo}{2} \frac{2 - \sqrt{6Fo}}{2 + \text{Bi}_2 \sqrt{6Fo}} \quad (51)$$

и при изменении температуры по всей толщине стенки кокиля (второй этап прогрева)

$$M = \frac{\alpha_m E}{1-\nu} \theta_{k0} \frac{X_2^3}{12(1 + 2/\text{Bi}_2)} \exp\left(-\frac{Fo - Fo'}{1/3 - 1/\text{Bi}_2}\right). \quad (52)$$

В выражениях (51) и (52): θ_{k0} — средняя калориметрическая температура при $Q_{окр} = 0$, отсчитанная от начальной температуры кокиля как от нуля (гл. II); $\text{Bi}_2 = \alpha_{2cp} X_2 / \lambda_2$; $Fo = a_2 t / X_2^2$ и Fo' — критерий Фурье, соответствующий первому этапу. Для температурной кривой кокиля, описываемой параболой второго порядка, при $\text{Bi}_2 \leq 1$ $Fo' = 1/6$.

Величину X'_{2r} включают в качестве дополнительного слагаемого в выражение (48). К началу образования газового зазора из-за коробления кокиля M может иметь большее значение, чем в любой последующей момент времени. Тогда разность $f_{1cp} - f_{2cp}$ положительна и общий газовый зазор увеличивается. В противном случае коробление кокиля уменьшает X_r .

Для числового примера, рассмотренного выше, по формулам (49)–(52) определяли величину X'_{2r} . С учетом этой величины построена штрихпунктирная кривая 6 на рис. 29. Как видно, с учетом X'_{2r} повышается точность расчетов величины газового

завора. Расчет показал, что для момента окончания затвердевания отливки газовый зазор, вызванный короблением кокиля, больше, чем зазор, образовавшийся в результате усадки отливки и расширения кокиля при нагреве ($X'_{2r} = 0,038$ мм, $X'_{1r} = 0,0065$ мм, $X_{2r} = 0,0203$ мм).

Чем больше габаритные размеры кокиля, тем большую роль играет его коробление в образовании газового зазора: размеры L_1 и L_2 входят в формулу (50) в квадрате. Для крупногабаритных панельных отливок X'_{2r} является величиной определяющей. Так, опытами с плоскими кокилями установлено, что 80—90% зазора образуется вследствие деформации изгиба стенки формы [56], поэтому всеми другими составляющими можно пренебречь.

Влияние силового взаимодействия отливки и кокиля. Рассмотренные выше экспериментальные данные и теоретические соображения, касающиеся величины X_r , относятся к тем случаям, когда между отливкой и кокилем нет силового взаимодействия. Такого рода взаимодействие имеет место при затрудненной усадке металла. На наклонной поверхности «болвана» кокиля появляется составляющая силы реакции, которая тормозит усадку. Составляющая эта как бы выталкивает отливку из формы. При этом между отливкой и кокилем образуется газовый зазор X'_{1r} . Величина X'_{1r} достигает максимального значения на торцевой поверхности «болвана» и тогда, когда фактическая усадка отливки совпадает со свободной. Из элементарных соображений следует

$$X'_{1r \max} = \frac{\alpha_m L (T_{кр} - T'_{1cp})}{2 \operatorname{tg} \varphi}, \quad (53)$$

где L — максимальный размер отливки в плоскости разреза кокиля; φ — уклон выступающей части кокиля. Так, для чугуновой отливки размером $L = 200$ мм при угле «болвана» $\varphi^\circ = 5^\circ$, $T_{кр} = 1423$ К и $T'_{1cp} = 1123$ К

$$X'_{1r \max} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 200 (1423 - 1123)}{2 \operatorname{tg} 5^\circ} \approx 4 \text{ мм.}$$

Фактическая величина X'_{1r} меньше, чем $X'_{1r \max}$, что объясняется торможением усадки формой. Однако и в этом случае рассматриваемый зазор имеет значительную величину.

Соответствующие доказательства можно найти в работе [13], где приведены данные о взаимном перемещении (раздвижке) облицованных полукокилей. Опыты проводили при заливке чугуна. Показано, что вследствие силового взаимодействия в системе отливка—форма величина зазора между полуформами (и, следовательно, между отливкой и кокилем) может составлять миллиметры.

7. НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ В ОТЛИВКАХ

Упругие термические напряжения в отливке в условиях плоского напряженного состояния определяют по формуле

$$\sigma = E \left(\varepsilon_p - \frac{\alpha_m}{1-\nu} T_1 \right), \quad (54)$$

где ε_p — величина реализованной деформации отливки, температура которой T_1 . Здесь T_1 отсчитывается от температуры образования в металле сплошного твердого скелета. Величину T_1 определяют с помощью расчетных зависимостей гл. II. Из теории температурных напряжений известно, что ε_p зависит от вида функции T_1 , конфигурации и условий закрепления тела или, в приложении к рассматриваемым условиям, — от неравномерности температурного поля и жесткости отливки, а также от степени торможения усадки кокилем.

Из выражения (54) видно, что величина температурных напряжений σ в отливке зависит от склонности к усадке (α_m) и механических свойств (E , ν) ее материала. Коэффициент Пуассона для практических расчетов можно принять равным 0,3. Этот параметр входит в расчетные формулы при плоском и объемном напряженном состоянии тела. При одноосном нагружении σ не зависит от ν .

В простейшем случае охлаждения свободной пластины ε_p определяется только видом температурной кривой. Легко показать, что при линейном температурном поле напряжения отсутствуют, а величина коробления свободной пластины достигает наибольшей величины. Таким образом, увеличение коробления отливки не обязательно связано с ростом σ .

Отливки, получаемые в кокилях, имеют стенки относительно небольшой толщины. Поэтому для них превалирующее значение имеют не перепады температур по толщине стенки, а разность средних температур между различными элементами. Эта разность может быть уменьшена дифференцированным подбором толщины покрытия (соответствующие примеры для облицованных кокилей приведены в гл. XVIII), стенки кокиля, начальной температуры и режима принудительного охлаждения формы, а также управлением величиной X_r . Для количественной оценки перечисленных мероприятий рекомендуются формулы гл. II.

В технологии литья в кокиль особую роль играет торможение усадки отливки, что связано с абсолютной неподатливостью кокиля. Некоторым исключением в этом отношении являются специальные и облицованные кокили (см. гл. XI и XVIII). Если отливка имеет выступы без уклонов и расположенные таким образом, что они оформляются одной металлической полуформой, то $\varepsilon_p = 0$. В этом случае, как следует из уравнения (54), возникают растягивающие напряжения максимальной величины. Уклоны

на выступах при отсутствии противодействия перемещению отливки со стороны другой полуформы (например, при литье в вытряхные кокили) приводят, как это было показано в предыдущем параграфе, к выталкиванию отливки из формы. Если величина перемещения равна $X_{\text{гmax}}^{\text{м}}$ [см. (53)], то усадка отливки протекает без торможения.

Рассмотренные закономерности подтверждаются производственным опытом. Действенным средством предотвращения трещин является раннее раскрепление собранного кокиля и извлечение металлических стержней. Рекомендуется также снимать усилие прижима полукокилей друг к другу на кокильных машинах. При литье чугуна эта операция осуществляется обычно сразу же после окончания заливки. Усилие извлечения стержня имеет наименьшую величину в период предусадочного расширения металла.

Трещины в отливках возникают, когда величина $\sigma(T_1)$ превышает значение предела прочности σ_v при соответствующей температуре [49, 137]. В течение всего периода охлаждения должно соблюдаться условие $\sigma(T_1) < \sigma_v$. Если отливка находится в пластичном состоянии, то нарушение сплошности металла происходит в результате исчерпывания его пластичности. Областью преимущественно пластических деформаций для стали и чугуна являются температуры соответственно выше 890—920 К и 670—920 К. В интервалах же 1320—1120 К и 1000—920 К (предположительно) наблюдается снижение пластичности чугуна.

Наличие в отливке термических узлов резко увеличивает опасность образования горячих трещин, что связано с реализацией в узлах всей или почти всей усадки отливки. Указанное обстоятельство отмечает, например, В. А. Комиссаров по опыту литья в кокиль чугунных труб с фланцами. Локализация деформации на некотором участке объясняется локальным снижением предела текучести с повышением температуры. Перераспределение деформации в отливке с горячим узлом используется в известном методе технологических испытаний литейных сплавов на трещиностойчивость [49]. Для борьбы с трещинами в перегретых участках отливки рекомендуются рассмотренные выше методы локального управления охлаждения и расчетный аппарат гл. II.

Материалы настоящего параграфа представляют собой основные положения теории напряженно-деформированного состояния отливки на стадии ее формирования. Детально этот вопрос рассмотрен в специальной литературе [48, 49, 137].

СТОЙКОСТЬ КОКИЛЕЙ

1. ВИДЫ И ПРИЧИНЫ РАЗРУШЕНИЯ КОКИЛЕЙ

Виды разрушения. Под стойкостью кокиля понимается его способность сохранять рабочие свойства. Стойкость определяется числом заливок, которое выдерживает кокиль до выхода из строя. Принято различать следующие виды разрушения кокилей: сквозные трещины (трещины первого рода), ориентированные трещины (второго рода), сетка разгара (трещины третьего рода), размыв рабочей поверхности и приваривание к ней металла отливки, коробление и механическое повреждение.

Сквозные трещины образуются обычно при первых заливках и появляются со стороны наружной поверхности стенки кокиля. Причиной этого вида разрушения являются растягивающие термические напряжения. Такие трещины чаще поражают формы из хрупких материалов — чугунов различных марок. Из практического опыта известно, что оребрение стенки кокиля в ряде случаев способствует появлению рассматриваемого дефекта. Стойкость кокиля против сквозных трещин резко снижается при наличии на его наружной поверхности концентраторов напряжений: острых выступов, литейных дефектов и т. п.

Ориентированные трещины являются наиболее распространенными причинами выхода кокилей из строя. Они возникают на рабочей поверхности формы, затем удлиняются, расширяются и углубляются по мере ее эксплуатации. Такие трещины появляются прежде всего на участках, где имеются концентраторы напряжений: на кромках рабочего гнезда формы, выступающих частях, в литниковых каналах и т. п.

Сетка разгара также относится к наиболее распространенному виду разрушения кокиля. Представляет собой густо расположенные на рабочей поверхности неориентированные и неглубокие трещины. По некоторым данным сетка разгара начинается по направлению следов режущего инструмента, с помощью которого обрабатывалась рабочая полость формы. Существует предположение, что местом зарождения таких трещин являются границы зерен металла кокиля. Сетка разгара не всегда служит причиной отбраковки кокиля; тщательное окрашивание рабочей полости позволяет получать отливки с удовлетворительным качеством поверхности. Однако при этом возникает опасность появления в отливках газовых раковин из-за скопления в трещинах окислов железа. Химические реакции, которые связаны с образованием этих дефектов в чугунных отливках, рассмотрены в гл. XI.

Размыв рабочей поверхности кокиля и приваривание к ней металла отливки свя-

заны с эрозионным воздействием потока расплава. Метод расчета прогрева формы потоком расплава изложен в гл. II. В гл. VI приводится параметр для оценки вероятности эрозионного разрушения поверхности формы (покрытия и собственно рабочей стенки). Установлено, что в основе размыва лежит механизм уноса вещества с поверхности тела под воздействием скоростного напора. Важно подчеркнуть, что способность металла противостоять этому воздействию резко падает при нагреве. Предупредить рассматриваемые виды разрушения кокиля можно изменением направления течения металла, применением эрозионно-стойких теплоизоляционных покрытий, рассредоточением и чередованием мест подвода металла и т. п. Что же касается влияния скорости течения металла, то оно оказывается весьма сложным и в каждом отдельном случае должно определяться методами, изложенными в гл. II и VI.

Коробление кокиля возникает и развивается по мере его эксплуатации и связано с необратимыми пластическими деформациями и ростом материала рабочей стенки. Коробление приводит к снижению точности отливки и образованию заливов между элементами кокиля. В последнем случае эксплуатация кокиля нередко оказывается невозможной. Коробление увеличивается при наличии остаточных (литейных или термических) напряжений, возникающих в кокиле в процессе его изготовления.

Причины разрушения. Из предыдущего следует, что стойкость кокиля зависит от тепловых, механических, химических, гидродинамических, диффузионных и других явлений. Однако, по мнению большинства специалистов, ведущая роль здесь принадлежит термомеханическим явлениям. Напряженно-деформированное состояние кокиля — решающий фактор его стойкости.

Особенность всех процессов, протекающих в кокиле и приводящих к его разрушению, заключается в их взаимосвязанности. Все они интенсифицируются при увеличении на кокиль тепловой нагрузки. Неравномерный нагрев по толщине и вдоль стенки кокиля вызывают появление упругих и пластических напряжений и деформаций. Последние приводят к остаточным напряжениям и деформациям противоположного знака.

Анализ показывает, что в рабочей поверхности стенки кокиля нереализованная термическая деформация ε обычно больше $2\varepsilon_{\text{т}}$, где $\varepsilon_{\text{т}}$ — величина деформации, соответствующей пределу текучести материала стенки при соответствующей температуре. Если $\varepsilon > 2\varepsilon_{\text{т}}$, в каждом цикле нагружения деформация растяжения сменяется деформацией сжатия. Рассмотренный механизм нагружения приводит к термической усталости материала стенки.

Строгий математический анализ термических напряжений в кокилях с учетом пластической деформации материала рабочей

стенки представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому ограничиваются обычно решением задачи в упругой постановке. Если же материал формы обладает четко выраженными пластическими свойствами (например, сталь), то полученное решение в упругой постановке рассматривается совместно с диаграммой деформаций для соответствующего материала. При этом учитывается известная в механике деформируемого тела теорема о разгрузке. Сказанное здесь поясняется примером, рассмотренным в следующем пункте.

Термические напряжения, но локального характера, возникают также вследствие структурных превращений и роста материала кокиля. Эти процессы интенсифицируются с повышением температуры нагрева.

Способность кокиля выдерживать термические напряжения зависит от механических свойств его материала при рабочих температурах. Свойства эти резко изменяются при нагреве. Так, например, при однократном нагреве до 900 К предел текучести стали 15 снижается примерно в 3 раза. Для большинства сталей в интервале 775—825 К наблюдается значительное снижение ударной вязкости. Это обстоятельство учтено в рекомендациях по применению параметра Π для оценки пригодности пластичных металлов в качестве материалов кокилей (см. табл. 19).

Здесь же необходимо подчеркнуть, что различного рода превращения в металле интенсифицируются не только с повышением температуры, но и при наложении напряжений. Эти превращения при циклическом термическом напряжении, в свою очередь, снижают механические свойства материала.

Изменениям в чугуне при многократном нагреве (поскольку этот материал чаще других используют для кокилей) ниже посвящен отдельный параграф. Метод определения снижающегося качества кокиля при циклических тепловых нагрузках обсуждается в гл. VII.

2. ТЕРМИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Между конструкцией кокиля и его стойкостью существует тесная связь. Так, например, чрезмерно большие ребра кокиля вызывают интенсивное развитие трещин на внутренней (рабочей) поверхности. Выше указывалось, что такие ребра могут явиться причиной трещин первого рода. Малые ребра могут не обеспечить необходимой жесткости и, следовательно, стойкости против коробления. Стойкость кокиля существенно зависит также от толщины стенки и размеров обрамления (части стенки по контуру рабочего гнезда).

Итак, конструкция кокиля определяет величину и характер температурных напряжений в нем. В связи с этим представляют

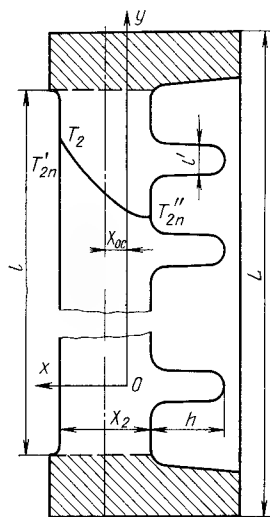


Рис. 30. Схема к анализу термических напряжений в плоском кокиле с обрамлением и ребрами (X_{2n} — расстояние между центрами тяжести сечения плоской стенки и кокиля)

интерес плоский кокиль, имеющий обрамление и подкрепленный ребрами, и цилиндрический кокиль, термическое расширение которого вдоль оси либо свободно, либо ограничено. К плоскому кокилю может быть отнесена форма, одно измерение которой значительно меньше двух других (половина разъемного кокиля, поддон, плоская изложница и т. п.), а к цилиндрическому — многие вытряхные (неразъемные) формы и изложницы для центробежной отливки труб.

Ниже рассматриваются принципиальные особенности напряженного состояния кокилей различных конструкций из упругого и упруго-пластичного материалов. Данные о влиянии параметров технологического процесса на условия работы кокилей приведены в параграфе 2 гл. VII. Получены они в результате расчетов с помощью ЭВМ. Указанные данные являются примерами конкретного подхода к расчетному проектированию технологий.

Плоский кокиль. Если рассматривать плоский кокиль как свободно деформируемую конструкцию и если действительный закон распределения температуры по сечению стенки кокиля аппроксимировать параболой, то, используя известные положения теории термоупругости, можно получить формулы для определения упругих напряжений в плоской стенке, которая непосредственно соприкасается с отливкой, а также в обрамлении и в ребрах (рис. 30). Для кокиля, имеющего только обрамление (ребра отсутствуют), формула для расчета напряжения в стенке толщиной X_2 имеет вид

$$\sigma_z = \frac{\alpha_{m_2} E_2}{1 - \nu_2} \left\{ \delta T_2 \left[\frac{l}{L} \left(\frac{1}{3} + \frac{x}{X_2} \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{X_2} \right)^2 \right] + \theta_{2n}^* \left(\frac{l}{L} - 1 \right) \right\}, \quad (55)$$

а формула для расчета напряжения в обрамлении

$$\sigma'_z = \frac{\alpha_{m_2} E_2}{1 - \nu_2} \left[\delta T_2 \left(\frac{1}{3} + \frac{x}{X_2} \right) + \theta_{2n}^* \right] \frac{l}{L}, \quad (55')$$

где α_{m_2} — коэффициент термического расширения; E_2 — модуль упругости; ν_2 — коэффициент Пуассона; δT_2 — перепад температуры по сечению плоской стенки с толщиной X_2 ; θ_{2n}^* — темпе-

ратура на внешней поверхности кокиля, отсчитанная от температуры обрамления как от нуля; l — размер плоской стенки (т. е. части формы, соприкасающейся с отливкой); L — габаритный размер кокиля.

При выводе формул (55) и (55') принята парабола второго порядка. Из формулы (55) видно, что, вопреки распространенному мнению, температурные напряжения в рабочей стенке зависят не только от δT_2 , но и от повышения температуры на внешней поверхности формы. Более того, в кокиле с очень массивным обрамлением ($l/L \rightarrow 0$) напряжения на внутренней поверхности плоской стенки ($x = X_2/2$) в пределе равны (минус относится к напряжению сжатия):

$$\sigma_z = - \frac{\alpha_{m_2} E_2}{1 - \nu_2} \theta_{2n}^*,$$

где θ_{2n}^* — температура на внутренней поверхности, отсчитанная от температуры обрамления как от нуля.

Только в случае, когда обрамление отсутствует ($l/L \rightarrow 1$), напряжение в плоском кокиле зависит от перепада температуры. То, что в кокиле с массивным обрамлением σ_z на внутренней поверхности зависит от θ_{2n}^* и в кокиле без обрамления — от δT_2 , подтверждается экспериментально.

На рис. 31 показана зависимость напряжений, найденных по формулам (55) и (55'), от отношения l/L при различных значениях отношения $\theta_{2n}^*/\delta T_2$ (0, 1, 2, 3, 4). Из графика следует, что чем больше отношение $\theta_{2n}^*/\delta T_2$ при неизменном δT_2 , тем выше напряжение сжатия.

Другой важный для практики вывод заключается в том, что увеличение обрамления (уменьшение отношения l/L) приводит к росту напряжений в стенке. Этим, по-видимому, объясняется наблюдаемое на практике преждевременное образование трещин в кокилях с массивным обрамлением. С помощью формул (55) и (55') можно подобрать оптимальные соотношения размеров стенки и обрамления.

Термоупругие напряжения в ребристом кокиле без обрамления представлены в виде графика на рис. 32. При построении кривых было принято равномерное расположение ребер, отношение высоты ребра к толщине стенки $h/X_2 = m$ и отношение суммы толщины ребер к размеру плоской стенки $(\sum l')/l = \kappa$ (см. рис. 30). Как видно, при $\theta_{2n}^* = 0$, т. е. в случае, когда внешняя поверхность не нагревается (что наблюдается в массивных кокилях), увеличение ширины (либо количества) и высоты ребер приводит к возрастанию напряжения сжатия на внутренней поверхности формы. В рассматриваемом случае на внешней поверхности кокиля напряжения изменяют знак.

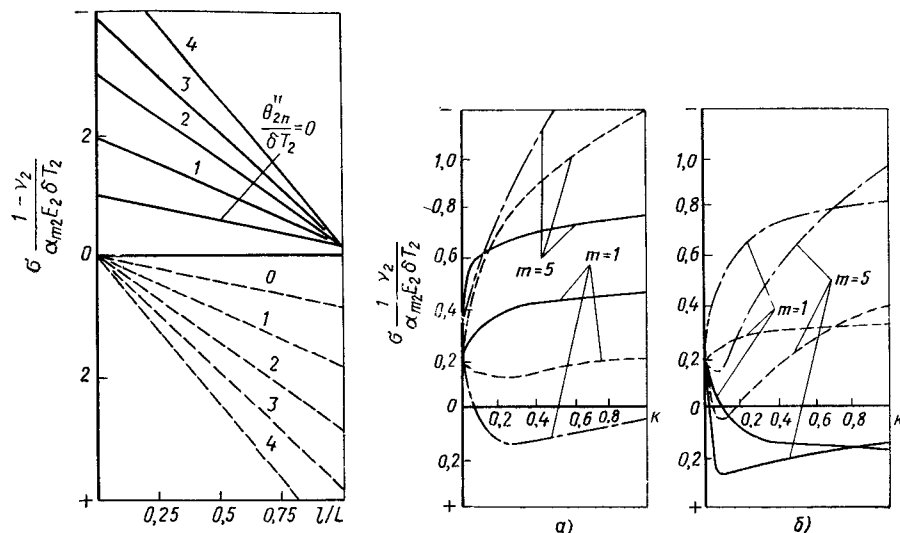


Рис. 31. Температурные напряжения на внутренней поверхности плоской стенки (сплошные линии) и обрамления (штриховые линии) в зависимости от величины обрамления

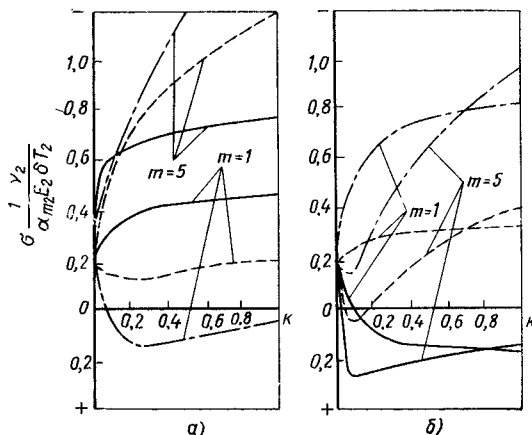


Рис. 32. Влияние оребрения плоской стенки на температурные напряжения на внутренней (а) и наружной (б) поверхностях:

— — — — — $\theta_{2n}/\delta T_2 = 0$; - - - - - $\theta_{2n}/\delta T_2 = 1$;
- · - · - · $\theta_{2n}/\delta T_2 = 2$

Из рис. 32 видно, что при повышении температуры на внешней поверхности ($\theta_{2n}/\delta T_2 > 0$) ребра не только изменяют величину напряжений, но и их знак. Очевидно появление растягивающих напряжений на внешней поверхности оребренной формы является причиной образования трещин, развивающихся с этой поверхности внутрь формы (т. е. трещин первого рода).

На рис. 33 приведены кривые изменения напряжения $\sigma \frac{1-\nu_2}{\alpha_{m2} E_2}$ на внутренней поверхности чугунного плоского кокиля при охлаждении в нем чугунной отливки толщиной $2X_1 = 40$ мм. Расчет температурного поля для реальных параметров литья производился по формулам параграфа 2 гл. II. Температурные напряжения рассчитаны для кокилей следующих конструкций: плоская стенка, вставленная в обойму большой жесткости (деформация стенки вдоль краев исключена); кокиль без обрамления, но с тонкими и длинными ребрами (изгиб исключен); кокиль с массивным обрамлением и длинными ребрами либо кокиль, у которого $l/L \rightarrow 0$ (деформация вдоль краев и изгиб исключены); кокиль без обрамления и ребер (свободная стенка).

Как видно из рис. 33, при исключенной деформации вдоль краев и особенно при исключенных осевой деформации и деформации изгиба напряжения увеличиваются с уменьшением толщины

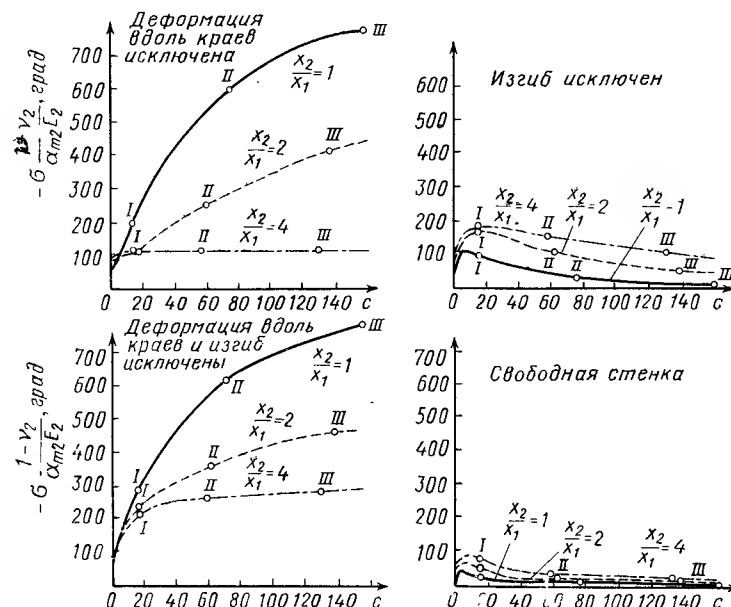


Рис. 33. Температурные напряжения в нагреваемой поверхности плоского кокиля с естественным воздушным охлаждением (материал отливки — чугун, $2X_1 = 40$ мм): I, II, III — моменты времени окончания соответственно отвода теплоты перегрева, за- твердевания и охлаждения до температуры выбивки

стенки кокиля. В указанных случаях напряжения достигают наибольшей величины ко времени извлечения отливки. При этом чем раньше извлечена отливка из кокиля, тем меньшие напряжения возникают в нем. Этот вывод находится в полном соответствии с практикой кокильного литья.

В кокиле, в котором исключен только изгиб или температурная деформация свободна, напряжения увеличиваются с увеличением толщины стенки кокиля. Для этих кокилей более ранняя выбивка преимуществ не дает, так как напряжения достигают максимума до начала затвердевания отливки.

Идеи и выводы настоящего параграфа послужили основой для разработки практических рекомендаций по выбору толщин стенок плоских кокилей. Указанные рекомендации в виде графика приведены в гл. VIII.

Цилиндрический неразъемный кокиль. Такие кокили бывают двух принципиально различных конструкций: кокили, термическое расширение которых вдоль оси не ограничено, и кокили, в которых это расширение исключено. Используя известные ре-

шения теории термоупругости и представляя температурное поле параболой второго порядка, имеем:

тангенциальные напряжения

$$\sigma_{\theta} = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \left\{ \frac{1}{12 R^2} \left[\frac{R_2^2 + R^2}{R_2 + R_1} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times (3R_1 + R_2) - \frac{(R_2 - R)^3}{(R_2 - R_1)^2} (3R + R_2) \right] - \left(\frac{R_2 - R}{R_2 - R_1} \right)^2 \right\}; \quad (56)$$

радиальные напряжения

$$\sigma_R = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \frac{1}{12 R^2} \left\{ - \frac{R_2^2 - R^2}{R_2 + R_1} (3R_1 + R_2) + \right. \\ \left. + \frac{(R_2 - R)^3}{(R_2 - R_1)^2} (3R + R_2) \right\}; \quad (57)$$

осевые напряжения при свободной осевой деформации

$$\sigma_z = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \left[\frac{1}{6} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2 + R_1} \right) - \left(\frac{R_2 - R}{R_2 - R_1} \right)^2 \right]; \quad (58)$$

осевые напряжения при исключенной осевой деформации

$$\sigma'_z = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \left[\frac{\nu_2}{6} \left(1 + \frac{2R_1}{R_2 + R_1} \right) - \left(\frac{R_2 - R}{R_2 - R_1} \right)^2 \right] - \alpha_m E_2 \theta_{2п}'''. \quad (58')$$

На внутренней поверхности кокиля ($R = R_1$):

$$\sigma_{\theta} = \sigma_z = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \left[\frac{3 + m}{6(1 + m)} - 1 \right], \quad \sigma_R = 0;$$

$$\sigma'_z = \frac{\alpha_m E_2}{1 - \nu_2} \delta T_2 \left[\frac{\nu_2 (3 + m)}{6(1 + m)} - 1 \right] - \alpha_m E_2 \theta_{2п}'''.$$

В формулах (56—58) R_1 — внутренний радиус; R_2 — внешний радиус; R — текущий радиус цилиндрического кокиля ($R_1 \leq R \leq R_2$); $m = R_2 : R_1$.

Из приведенных формул видно, что осевые напряжения зависят от характера осевой деформации: с ограничением ее они резко возрастают, причем определяются как δT_2 , так и $\theta_{2п}'''$. В цилиндрических кокилях, осевая деформация которых свободна, могут образовываться поперечные и продольные трещины на внутренней поверхности, а в кокилях с исключенной осевой деформацией можно ожидать появления прежде всего поперечных трещин. Очевидно для цилиндрического кокиля, как и для плоского, в зависимости от конструкции в одном случае целесообразно стремиться к уменьшению δT_2 , а в другом — к уменьшению $\theta_{2п}'''$.

С помощью формул (56)—(58) рассчитывали график, рекомендованный в гл. VIII для выбора толщин стенок цилиндрических

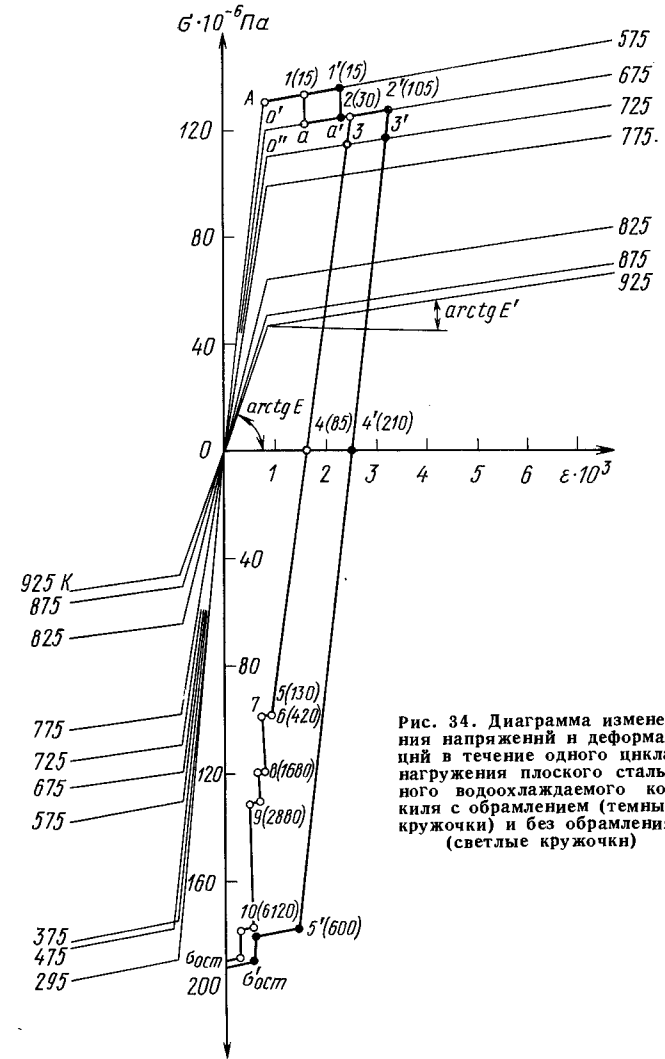


Рис. 34. Диаграмма изменения напряжений и деформаций в течение одного цикла нагружения плоского стального водоохлаждаемого кокиля с обрамлением (темные кружочки) и без обрамления (светлые кружочки)

кокилей. Необходимые для расчетов температуры находились с помощью зависимостей, приведенных в параграфе 2 гл. II.

Особенности напряженного состояния кокиля из упруго-пластичного материала. При построении диаграммы (рис. 34), показывающей изменение напряжений и деформаций, использованы экспериментальные данные величин нереализованной термической деформации стального водоохлаждаемого кокиля ($X_2 = 34$ мм) с обрамлением и без обрамления. Кокиль заливали чугуном; толщина стенки отливки $2X_1 = 30$ мм. Тонкие линии

на диаграмме представляют собой схематизированные кривые деформирования стали 15 при различных температурах (цифры у наклонных прямых). Между модулем упругости E и прочностью E' принято соотношение $E' = 0,02E$.

Поверхностный слой кокиля без обрамления до точки A деформируется упруго, а далее до точки 1 — пластически (белые кружочки и номера точек без штрихов относятся к кокилю без обрамления, цифры в скобках обозначают время в секундах). В связи с повышением температуры и снижением поэтому величины σ_t напряжения уменьшаются (точка a), затем вновь повышаются из-за роста деформации до точки 2 . Абсцисса точки 2 соответствует максимальной деформации, которая наступила на 30-й секунде. Скачкообразный переход от точки 1 к точке 2 объясняется схематизированным изображением свойств стали. С уменьшением деформации разгрузка осуществляется по линии, параллельной $0-0'$, до точки 3 , а далее — в связи с повышением температуры слоя — по прямой, параллельной $0-0''$. Так продолжается до тех пор, пока напряжение не достигнет предела текучести, но уже при растяжении (через точки 4 и 5 до точки 6). От точки 6 до точки 7 материал пластически растягивается. До точки 8 напряжения растут без изменения деформации только вследствие повышения предела текучести при снижении температуры. Последняя ступень построения диаграммы определяет величину остаточных напряжений $\sigma_{ост}$.

Деформация рабочего слоя кокиля с обрамлением описывается ломаной линией $0-A-1'-a'-2'-3'-4'-5'-\sigma'_{ост}$.

Если сравнить данный случай с рассмотренным, то видно, что при наличии обрамления площадь диаграммы, соответствующая работе пластической деформации, значительно больше. В связи с этим становится очевидными понижение стойкости кокилей при увеличении размеров обрамления.

Приведенные на рис. 34 кривые позволяют объяснить более высокую стойкость кокилей в случае, если их реже охлаждать до комнатной температуры. Из кривых следует, что с ростом $T_{2н}$ снижаются $\sigma_{ост}$ и, главное, уменьшается знакопеременная часть пластической деформации. Конечно эти рассуждения справедливы, если повышение T_2 не вызывает перегрева стенки и бурного развития других процессов, приводящих к разрушению кокиля (фазовые превращения, рост металла, окисление, обезуглероживание, насыщение серой и т. п.).

Остаточные напряжения являются причиной коробления кокилей. Если упругое выпучивание плоской стенки направлено в сторону нагреваемой поверхности, т. е. отливки, то остаточное — в противоположную. Упругое выпучивание плоских кокилей рассматривалось в параграфе 6 гл. IV в связи с обсуждением вопроса об образовании зазора между отливкой и формой.

3. ИЗМЕНЕНИЯ В ЧУГУНЕ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

При циклическом изменении температуры в стенке чугунного кокиля возможны следующие изменения: насыщение рабочей поверхности серой и обезуглероживание, фазовые превращения, окисление и рост металла.

В работе [51] утверждается, что уже на первых этапах термической усталости в рабочей поверхности чугунного кокиля увеличивается плотность дислокаций. Особенно это заметно на вышедших из строя кокилях [108].

В значительных пределах может изменяться содержание серы в приповерхностных зонах чугуна, особенно в случае длительного использования кокилей с краской, содержащей сернистые соединения. Содержание серы может повыситься до 0,3% и более и привести к явлению сульфидной коррозии и ускорению образования крупной сетки разгара.

Наиболее опасным для некоторых типов кокилей является процесс окисления металла при термоциклировании. Чем выше тепловое нагружение и чем выше максимальная температура рабочей поверхности кокиля, тем большую опасность представляет процесс окисления его материала. Интенсивность окисления зависит также от вида газовой среды, формы и количества графита, условий эксплуатации и хранения кокиля, а также наличия в его рабочей поверхности пор и трещин. Известно, что железо особенно интенсивно окисляется при температурах свыше 1000 К.

В процессе циклического нагрева в поверхностных слоях чугунного кокиля происходит графитизация с одновременным обезуглероживанием матрицы; интенсивность этих процессов зависит от теплового нагружения кокиля (рис. 35). Приповерхностные слои полностью ферритизируются на глубину от 0,2 до 3—4 мм. В местах частичного или полного выгорания графита создаются благоприятные условия для образования разной плотности и глубины залегания зон окисления.

Следует заметить, что в зависимости от тепловой нагруженности кокилей выявляется разная структура окислов: сплошные — в кокилях с большей тепловой нагруженностью, «пушистые» — в кокилях меньшей нагруженности. Глубина распространения окислительных процессов зависит во многом от наличия и природы несплошностей в чугуне. В чугуне кокиля при термоциклировании заметны и другие перераспределения

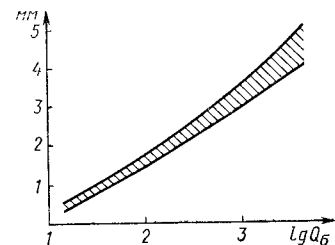


Рис. 35. Влияние теплового нагружения (Q_0 , МДж/м²) на глубину обезуглероживания чугунового кокиля

элементов. В окисленных участках это обнаружено А. А. Барановым и др. [7].

Одним из главных изменений в чугунах при термоциклировании следует считать рост металла, часто являющийся решающим фактором снижения термической стойкости. Рост чугуна протекает тем интенсивнее, чем выше температура поверхности кокиля. Как правило, рост чугуна связывают с диффузией углерода и самодиффузией железа. Поэтому различные способы торможения диффузии углерода могут положительно сказаться на ростоустойчивости чугуна.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ КОКИЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

1. НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПОКРЫТИЙ

Назначение покрытий кокилей весьма многообразно. С помощью покрытий управляют условиями охлаждения (затвердевания) отливки, предохраняют рабочую стенку кокиля от термического удара и эрозионного воздействия, создают в форме определенную газовую атмосферу, повышают смачиваемость поверхности кокиля расплавом, обеспечивают поверхность модифицирование и легирование отливки, изменяют газопроницаемость вент, воздействуют на силу трения между отливкой и кокилем. Однако основное назначение покрытий кокилей — управление теплообменом между отливкой и формой. Так как участие покрытий в этом процессе определяется величиной параметрического критерия X_2/X_1 , то все покрытия можно разделить на две группы: тонкослойные и толстослойные, или облицовки (см. гл. II).

На практике применяют покрытия различной долговечности. В связи с этим их целесообразно условно разделить на три подгруппы — разовые, многоразовые и постоянные. Под постоянными понимают такие покрытия, долговечность которых соизмерима с межремонтным сроком формы. К ним, например, относятся покрытия, напыленные пламенным или плазменным способом, полученные методами электрохимической или химико-термической обработки и др.

Покрытия обеих групп могут иметь слоистое строение. Для первой группы (тонкослойные) характерно следующее сочетание: полупостоянный или постоянный подслон и разовая краска. Покрытия второй группы (толстослойные) часто включают кроме облицовки тонкий полупостоянный или постоянный подслон и разовую краску.

Покрытия должны обладать определенными термофизическими, термомеханическими, термохимическими и технологическими свойствами. Понятно также, что простота нанесения (восстановления) и долговечность являются важнейшими характеристиками покрытий.

В настоящей главе рассматриваются явления, происходящие в покрытиях. Анализируются эксплуатационные свойства специальных покрытий — постоянных и облицовок. Сведения о конкретных составах обычных кокильных красок приведены в третьем разделе, где речь идет о литье различных сплавов.

2. ТЕРМОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Расчетные зависимости. Какие именно термофизические характеристики важны для покрытий различных групп, видно из формул гл. II: для тонкослойных — теплопроводность, для тол-

стослойных (облицовок) — весь комплекс стандартных характеристик.

Покрытия кокилей являются гетерогенными системами различной структуры. Перенос теплоты через такие тела осуществляется теплопроводностью, радиацией и конвекцией (естественной и вынужденной). Этот процесс в ряде случаев осложняется термическими эффектами и массопереносом вследствие фазовых и химических превращений [25, 118]. Поэтому теплопроводность покрытия λ представляет собой эффективную характеристику способности проводить теплоту.

Теплопроводность является структурно-чувствительным свойством. Для покрытий кокилей характерны три структуры: с вкраплениями, с взаимопроникающими компонентами и комбинированные. Примером структуры с вкраплениями могут служить песчано-смоляные, песчано-жидкостекольные и керамические облицовки. Минеральный наполнитель в таких покрытиях находится в виде почти неконтактирующих включений. Структуру из взаимопроникающих компонент имеют покрытия с волокнистым наполнителем. Весьма распространены комбинированные системы: матрица структуры с вкраплениями представляет собой композицию из континуальных фаз — порового пространства и связующего.

Подробный анализ особенностей теплопереноса во всех трех системах и соответствующие формулы для определения λ можно найти в монографии Г. Н. Дульнева и Ю. П. Заричняка [54]. Остановимся, в частности, на анализе формулы, полученной В. И. Одеlevским для расчета теплопроводности тела с вкраплениями одного качества:

$$\lambda = \lambda_m \left[1 - \frac{P_1}{(1 - v_m)^{-1} - (1 - P_1) 3^{-1}} \right], \quad (59)$$

Здесь $v_m = \lambda_1 / \lambda_m$; λ_1 и λ_m — теплопроводности матрицы—фазы, в которой находятся соответственно вкрапления и включения; P_1 — объемная концентрация твердой фазы включения. Для покрытий P_1 вычисляют следующим образом:

$$P_1 = \kappa_1 \frac{\rho}{\rho_1},$$

где κ_1 — удельное содержание включения; ρ , ρ_1 — плотность соответственно покрытия и включения.

Анализ показывает, что основные структурные составляющие пористых покрытий кокилей имеют значения λ , различающиеся на 2—3 порядка. Следовательно, параметр v_m , входящий в формулу

(59), приобретает значение $v_m \gg 1$. В этом случае формула (59) упрощается:

$$\lambda = \lambda_m \left[1 + 3 \frac{1 - P_m}{P_m} \right], \quad (60)$$

где P_m — относительный объем матрицы.

В подавляющем большинстве разовых и полупостоянных покрытий в роли матрицы выступает поровое пространство, тогда $P_m \approx P_v$, где P_v — пористость. Учитывая это и формулу (60), заключаем, что перенос теплоты в рассматриваемых покрытиях определяется пористостью и теплопереносом в порах. Таким образом, теплоизоляционные свойства кокильных покрытий зависят от их структуры не в меньшей степени, чем от состава.

Величина λ_m , в свою очередь, является эффективной характеристикой:

$$\lambda_m = \lambda_l + \lambda_{ml} + \lambda_k, \quad (61)$$

где λ_l , λ_{ml} и λ_k — лучистая, молекулярная и конвективная составляющие теплопроводности матрицы. Анализ экспериментальных данных с помощью формулы (60) и (61) показал, что в обычных условиях литья теплоперенос в поровом пространстве осуществляется в основном лучеиспусканием и истинной теплопроводностью, а роль конвективного теплопереноса пренебрежимо мала.

Из формул (60) и (61) следует, что основными факторами при создании покрытий с заданными свойствами являются пористость и состав газообразных продуктов, находящихся в порах (коэффициенты излучения материалов, которые обычно входят в покрытия, различаются между собой не очень сильно). Так, увеличение пористости с 0,3 до 0,4, т. е. на 33%, повышает λ на 45%, а замена азота в поровом пространстве на водород приводит к росту λ_{ml} почти на порядок.

Удельная теплоемкость является вполне аддитивным свойством. Поэтому определение этой термофизической характеристики расчетным путем затруднений не вызывает.

Экспериментальные данные. В монографии [17] дано фундаментальное обоснование экспериментальных методов определения теплопроводности тонкослойных покрытий: метода заливки, намораживания и погружения. Там же приведены многочисленные опытные данные для разовых и полупостоянных составов.

В табл. 3 и 4 в качестве примера указаны значения теплопроводности некоторых кокильных покрытий [11, 21]. Испытания проводили методами заливки и погружения.

Сведения о теплопроводности и пористости газопламенных и плазменных покрытий приведены в работе [147]. Из них следует, что с повышением температуры теплопроводность увеличи-

Таблица 3

Теплопроводность некоторых характерных кокильных покрытий [21]

Номер покрытия	Состав, % по массе										λ , Вт/(м·К)
	Мел. тонкого помола	Коллоидальный графит	Маршалит	Прокаленный тальк	Огнеупорная глина	Древесные мелкие опилки	Марганцовокислый калий	Пектиновый клей	Оглантинский бенгони	Мылонафт	
1 *	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,5
2 **	—	53,4	—	—	—	—	—	3	3,4	0,2	0,465
3	—	—	20	15	—	—	—	—	—	—	0,245
4	12,4	1,7	—	—	—	—	—	—	—	—	0,175
5	—	—	32	—	6,15	1,2	0,15	—	—	—	0,163
6	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,120

* Анодная пленка на кокиле из сплава АЛ9.

** Паста ГВ.

Таблица 4

Теплопроводность тонкослойных кокильных покрытий, определенная методом погружения в жидкий чугун [11]

№ покрытия	Состав, мас. ч.								λ , Вт/(м·К)
	Прокаленный тальк	Маршалит	Молотый шамот	Огнеупорная глина	Каолин	Черный графит	Молотый ферросилиций	Жидкое стекло	
1	25	—	—	—	—	—	—	5	0,287
2	—	10	—	—	—	—	—	5	0,418
3	—	25	35	25	—	—	—	15	0,366
4	—	—	20	30	20	12	—	18	0,535
5	—	—	—	5	—	35	35	—	0,379

вается, а при 1273 К теплопроводность газопламенных и плазменных покрытий из окиси алюминия достигает уровня теплопроводности наиболее теплопроводных разовых и многоразовых составов.

Экспериментальный метод определения коэффициента температуропроводности покрытий второй группы (облицовок) предложен на основе уравнения (19), описывающего температурное

поле облицованного кокиля на стадии затвердевания отливки. В случае, когда внешняя поверхность кокиля теплоизолирована, а между отливкой и облицовкой, как и между облицовкой и кокилем, термический контакт является идеальным ($\alpha_1 = \alpha_2 = \infty$), уравнение может быть решено относительно $a_{об}$.

Составы исследованных облицовок и найденные в экспериментах значения их термofизических свойств приведены в табл. 5. Анализ табличных данных показывает, что с увеличением температуры заливаемого металла значения $\lambda_{об}$ и $a_{об}$ возрастают. Объясняется это увеличением передачи теплоты в порах облицовки путем радиации, т. е. величины $\lambda_{л}$.

Таблица 5

Термofизические свойства разовых песчано-смоляных облицовок

№ состава	Состав, % по массе				ρ , кг/м ³	Заливка алюминием			Заливка чугуном		
	Песок К016	Цирконовый концентрат	ПК-104	Черный графит		c , Дж/кг·К	$a \cdot 10^6$, м ² /с	λ , Вт/м·К	c , Дж/кг·К	$a \cdot 10^6$, м ² /с	λ , Вт/м·К
1	97	—	3	—	1450	968	0,215	0,303	1046	0,409	0,622
2	95	—	5	—	1400	992	0,236	0,328	—	—	—
3	—	98	2	—	2350	623	0,237	0,348	660	0,400	0,622
4	96,5	—	3	0,5	1480	970	0,190	0,274	—	—	—

3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Под термомеханическими свойствами покрытий понимаются их способность выдерживать нагрузку в условиях нагрева. Характеристики этих свойств не стандартизованы и относятся, по существу, к технологическим показателям. Поэтому величины соответствующих характеристик зависят от принятых методов испытаний. Необходимость изучения термомеханических свойств вызвана тем, что ими определяется стабильность свойств и эффективность покрытий при эксплуатации: способность сопротивляться растрескиванию, отслоению от поверхности кокиля, размыву расплавом. Перечисленные факторы в конечном счете определяют качество отливки и долговечность кокиля.

Напряженное состояние покрытия. С позиций механики деформируемого тела покрытие можно рассматривать как пластину или оболочку. Покрытие в виде пластины является наиболее характерным. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния плоского покрытия в упругой постановке сводятся

к следующему. Вследствие меньшего перепада температур в кокиле, чем в покрытии, и значительно большей жесткости кокиля, чем покрытия, деформация изгиба последнего исключена. При данном условии формула для расчета температурных напряжений в покрытии, которое находится в прочном сцеплении с кокилем, имеет весьма простой вид:

$$\sigma = - \frac{\alpha_{m3} E_3}{1 - \nu_3} \theta_3. \quad (62)$$

Здесь сохранены обозначения гл. II и IV. Индекс «3» относится к покрытию. Формула (62) не учитывает технологических напряжений, возникающих при нанесении покрытия. Знак минус в формуле означает напряжения сжатия.

Сила, стремящаяся сдвинуть покрытие относительно защищаемой поверхности,

$$P = \frac{\alpha_{m3} E_3}{1 - \nu_3} \int_0^{X_3} \theta_3 dx, \quad (63)$$

где X_3 — толщина слоя. Сила P отнесена к единице длины линии в плоскости покрытия. Напряжения среза, создаваемые силой P в площади F_2 контакта покрытия с защищаемой поверхностью, $\sigma = PL/F_2$, здесь L — длина плоского покрытия по нормали к направлению сдвига. Покрытие отслаивается при условии $\sigma > \sigma_{\text{ср}}$, где $\sigma_{\text{ср}}$ — прочность сцепления покрытия с кокилем при испытании на срез.

Из выражений (62) и (63) следует, что вероятность растрескивания и отслоения покрытия от кокиля тем выше, чем больше коэффициент термического расширения α_{m3} , модуль упругости E_3 и температура θ_3 . Значения α_{m3} для некоторых газопламенных и плазменных покрытий указаны в работе [147]. Термическое расширение песчано-смоляных облицовок на цирконовом наполнителе примерно в 3 раза меньше, чем на кварцевом.

Способность покрытия выдерживать термомеханическое воздействие может быть оценена параметром Π_1 — отношением предела прочности покрытия $\sigma_{в3}$ к напряжениям, вызванным температурой. Учитывая формулу (62), имеем

$$\Pi_1 = \frac{\sigma_{в3}(1 - \nu_3)}{\alpha_{m3} E_3 \theta_3}. \quad (64)$$

Величину Π_1 целесообразно находить для наиболее тяжелых условий термического нагружения. Такие условия возникают на рабочей поверхности покрытия при идеальном контакте расплава с формой. Так как коэффициент аккумуляции теплоты материала

отливки (металла) значительно больше коэффициента аккумуляции теплоты материала покрытия (неметалла), то

$$\Pi_1 \approx \frac{\sigma_{в3}(1 - \nu_3)}{\alpha_{m3} E_3 \theta_{\text{зал}}}. \quad (64')$$

Из выражения (64') видно, что механическая теплостойкость зависит от заливаемого в кокиль металла (значения $\theta_{\text{зал}}$). Значение Π_1 тем выше, чем больше при температуре заливки $\sigma_{в3}$ и меньше α_{m3} . Широко известная литейщикам повышенная теплостойкость песчано-смоляных смесей на цирконовом песке объясняется тем, что α_{m3} этого материала меньше, чем кварцевого песка. Пределы изменения коэффициента Пуассона невелики. Поэтому роль ν_3 мала.

Эрозия покрытия (разрушение поверхности тела при течении жидкости или газа) снижает теплозащитные свойства покрытия и приводит к дефектам в отливках: засорам, наплывам, шероховатости и т. д. Отрыв частичек с поверхности формы происходит в случае, когда скоростной напор расплава становится равным пределу прочности покрытия в тонком поверхностном слое или больше его. Следовательно, параметром гидродинамического уноса вещества с поверхности формы является выражение

$$\Pi_2 = \frac{2\sigma_{в3}}{\rho_1' u^2}. \quad (65)$$

Температурная зависимость прочности покрытий первой группы не изучена. Благополучнее обстоят дела с покрытиями второй группы. Многие ученые исследовали влияние температуры на прочность обычных формовочных смесей, в том числе и таких, которые применяют в качестве облицовок кокилей. Экспериментальные данные могут быть аппроксимированы параболой, проходящей через две точки: максимальную температуру T'_0 , при которой сохраняется прочность $\sigma_{в30}$, определенная при нормальных условиях, и температуру T_p , при которой наступает полное разупрочнение смеси. Соответствующая функция имеет вид

$$\sigma_{в3} = \sigma_{в30} \left(\frac{T_p - T_3}{T_p - T'_0} \right)^m, \quad (66)$$

где m — показатель параболы. На основании экспериментов для песчано-смоляной облицовки можно принять $m = 3$. Формула (66) справедлива, если $T'_0 \leq T_3 \leq T_p$. При $T_3 < T'_0$ $\sigma_{в3} = \sigma_{в30}$, при $T_3 > T_p$ $\sigma_{в3} = 0$.

Зависимость (66) сильно осложняет анализ эрозионной стойкости покрытия. Дело в том, что при снижении скорости заливки уменьшается скоростной напор, но повышается температура нагрева рабочей поверхности формы (вопрос этот подробно рассмотрен в гл. II) и, следовательно, падает прочность.

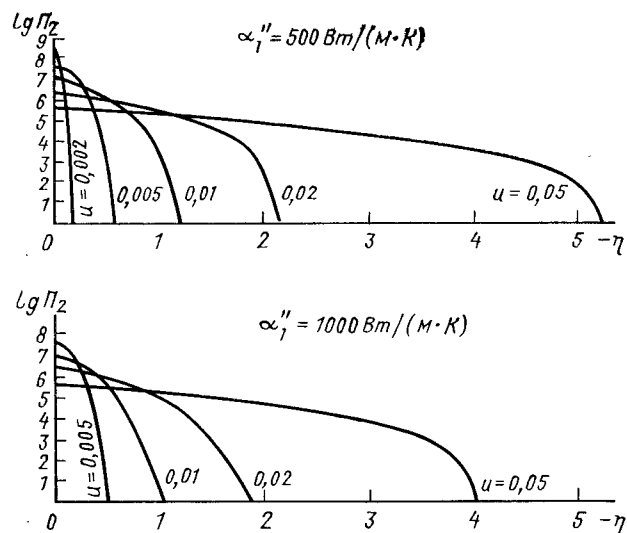


Рис. 36. Изменение параметра гидродинамического уноса поверхности облицовки потоком расплава в зависимости от скорости u и безразмерной координаты η

На рис. 36 представлены кривые, рассчитанные по формуле (65) для примера, рассмотренного в параграфе 3 гл. II (залитка чугуна в кокиль, облицованный песчано-смоляной смесью). При этом учитывалась зависимость (66), в которой было положено $T_0 = 420$ К и $T_p = 720$ К. Анализ кривых на рис. 36 показывает следующее. При значительном падении $\sigma_{вз}$ с повышением температуры увеличение скорости u заливки удлиняет путь, который может пройти металл, не вызывая опасности размыва формы (пересечение кривых с осью абсцисс). В то же время с ростом u увеличивается вероятность эрозии формы на фронте потока (левая часть графиков). Параметр Π_2 снижается по ходу потока. Кроме того, он снижается с повышением интенсивности теплообмена.

Экспериментальные данные. Для определения прочности покрытия при срезе $\sigma_{ср}$ и при отрыве $\sigma_{отр}$, а также для оценки работы адгезии покрытия к кокилю предложены различные приборы. Многие из них описаны в книге [124].

Обширные исследования с помощью одного из таких приборов проведены К. П. Фадеевой на тонкослойных кокильных покрытиях (красках), состоящих из 25% наполнителя, 75% воды и различных количеств связующего сверх 100%. Изучали также краски, содержащие 25% наполнителя, 75% воды и 7% (сверх 100%) жидкого стекла плотностью 1500 кг/м³ с модулем 2,6 при различной концентрации активизирующих добавок. Результаты экспериментов представлены на рис. 37 и 38.

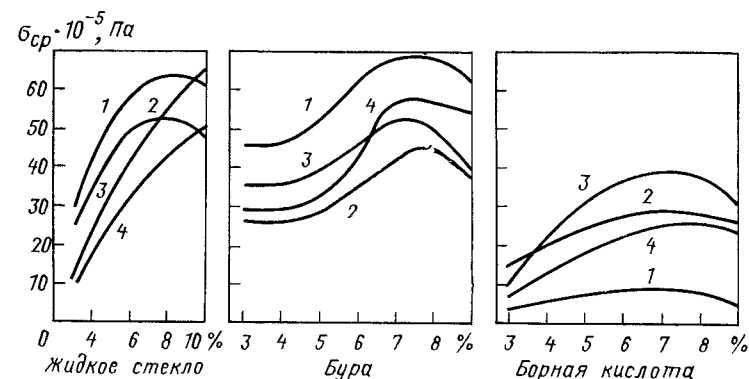


Рис. 37. Прочность при срезе кокильных покрытий с различным содержанием связующих: 1 — шамот; 2 — пылевидный кварц; 3 — тальк; 4 — асбест

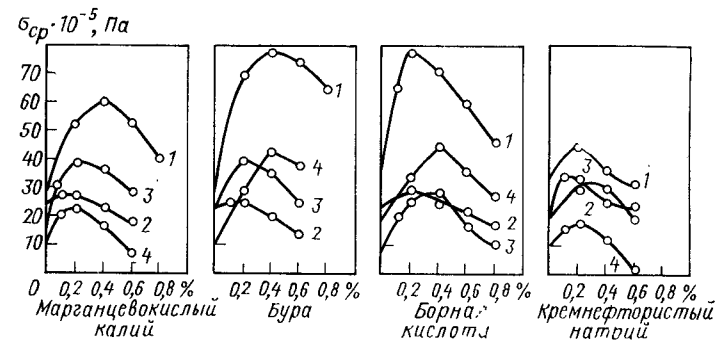


Рис. 38. Влияние активизаторов на прочность сцепления покрытий с поверхностью кокиля: 1 — шамотная краска; 2 — на пылевидном кварце; 3 — тальковая; 4 — асбестовая

На рис. 37 видно, что наполнители (шамот, пылевидный кварц, тальк и асбест) избирательно сочетаются с неорганическими связующими (жидким стеклом, бурой и борной кислотой). Такие добавки, как марганцевокислый калий, бура и борная кислота, могут существенно повысить прочность сцепления краски с кокилем (рис. 38). Повышение это имеет экстремальный характер. Концентрация добавки, при которой $\sigma_{ср}$ имеет максимум, зависит от типа добавки.

Исследования А. А. Тимофеева показали, что работа адгезии покрытия, содержащего маршалит, воду и постоянное количество жидкого стекла (6%), снижается по мере повышения концентрации наполнителя. Глина отрицательно влияет на прочность сцепления покрытий на основе маршалита, асбеста и их комбинаций. По прочности сцепления чисто глинистое покрытие уступает краске

на основе маршалита (при одинаковой концентрации жидкого стекла). Отмечается, что существует оптимальная по величине адгезии концентрация такой добавки, как KMnO_4 . Эти данные согласуются с данными, полученными К. П. Фадеевой.

4. ХИМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Химические свойства. Одной из характеристик этих свойств является газотворная способность. Данная характеристика относится к показателям химической теплостойкости материалов. Высокая газотворная способность недопустима, если кокиль имеет глубокие, трудно вентилируемые полости. В этих условиях выделяющиеся газы могут препятствовать заполнению формы и вызывать в отливках газовые раковины. Практика показывает, что при определенном соотношении скорости заливки и выделения газов из компонентов покрытия, а также рационально организованной системе вентиляции формы дефекты в отливках не образуются. В таких случаях повышенная газотворная способность относится к числу положительных свойств покрытий.

Согласно данным работы [124], газотворную способность используют для создания в кокилях восстановительной атмосферы и предохранения поверхности отливок от неметаллических включений, например при литье стальных и медных заготовок. В указанном случае при соприкосновении расплава с покрытием кокиля происходит кипение металла у поверхности формы, благодаря чему окисные пленки и включения, плавающие на зеркале расплава, не затвердевают на поверхности отливок.

В некоторых случаях добиваются окислительной атмосферы, например при получении отливок из низкоуглеродистой стали. Поверхностное науглероживание низкоуглеродистой стали, которое происходит в восстановительной атмосфере, затрудняет обрабатываемость отливок. По-видимому, в создании окислительной атмосферы заключается смысл применения покрытий, содержащих карбонаты. Термическая диссоциация этих материалов сопровождается образованием CO_2 , чем создается атмосфера окислительного свойства.

Термическая деструкция (разрушение структуры) органических связующих покрытий приводит еще к одному эффекту: образованию в покрытии многочисленных пор.

Газотворная способность некоторых связующих и добавок, которые применяют в покрытиях кокилей, приведена в работе [72]. Оценивая эти данные, необходимо учитывать, что химическая теплостойкость органических материалов и, следовательно, газовыделение покрытий зависят от минеральных и других примесей. Этим, видимо, объясняется то, что газовыделение песчано-смоляных смесей, используемых для облицовки кокилей, непропорциональна содержанию фенолформальдегидного связующего [68].

Технологические свойства. Инертность покрытий по отношению к материалу отливки — в общем случае положительное свойство. Однако существует исключение. Касается оно покрытий для поверхностного модифицирования и легирования отливок. Теллуrowые и сурьмянистые композиции применяют для предотвращения аномальной структуры тонкостенных чугунных отливок [107]. С применением поверхностно-модифицирующих составов многие исследователи связывают, в частности, решение проблемы получения в обычных кокилях чугунных отливок без отбела. В такие покрытия включаются обычно ферросилиций и графит. Однако в работе [11] отрицается модифицирующее действие подобных покрытий.

Отсутствие здесь единой точки зрения объясняется, по-видимому, теми частностями, которые характеризуют условия проведения экспериментов. Эти частности могут быть поняты в свете термодинамической теории [24]. Согласно этой теории насыщение поверхности отливки веществом покрытия создается интенсивным фильтрационным переносом: расплава в поровом пространстве покрытия, расплавившегося покрытия в капиллярах между затвердевшим в порах покрытия металлом и по обоим схемам одновременно. Причем этот процесс получает развитие при смачивании материала покрытия жидким металлом: движущей силой переноса служит капиллярное давление. Таким образом, эффект смачивания — решающее условие поверхностного легирования и модифицирования.

Путем решения уравнения неразрывности для жидкости, движущейся в пористой среде, с учетом закона Дарси получено, что глубина проникновения расплава в пористую среду

$$l = \sqrt{2 \frac{k}{\mu P_v} \Delta p t}, \quad (67)$$

где k — коэффициент проницаемости. Избыточное давление Δp в общем случае равно алгебраической сумме давлений Δp_i термодинамических и капиллярных сил, скоростного и гидростатического напора, гидравлического удара и внешних сил. Из зависимости (67) следует, что для рассматриваемого явления принцип суперпозиции можно применять, если суммировать квадраты величин l под воздействием Δp_i в отдельности.

Капиллярное давление Δp_1 в цилиндрическом канале диаметром d рассчитывают по известной формуле

$$\Delta p_1 = \frac{4\sigma \cos \theta}{d},$$

где σ — поверхностное натяжение; θ — угол смачивания.

Коэффициент k связан с пористостью P_V и эквивалентным диаметром частицы d_s покрытия эмпирической зависимостью

$$k = n \frac{P_V^3}{(1 - P_V)^3} d_s^2, \quad (68)$$

где n — числовой коэффициент.

Формула (68) справедлива для зернистых систем.

Приведенные выражения представляют собой математическую модель рассмотренного выше физического механизма поверхностного легирования. Они позволяют количественно оценить влияние каждого из факторов.

Важным фактором, влияющим на массоперенос в поверхностных слоях формы и отливки, является также интенсивность теплообмена между ними. С увеличением интенсивности охлаждения отливки глубина легированного (модифицированного) слоя уменьшается. Кроме того, установлено, что температура твердой поверхности, на которой растекается расплав, должна составлять не менее 80% от температуры затвердевания чистых металлов и эвтектик или температуры солидуса для сплавов, затвердевающих в интервале температур.

На формирование поверхностного слоя металла значительное влияние может оказывать характер кристаллической структуры материалов покрытий. Согласно принципу размерного и ориентационного соответствия П. Д. Данкова реализация этой возможности зависит от кристаллографического соответствия возникающей фазы и исходной подложки. Исходя из этого, В. И. Мисечко и А. Н. Цибрик утверждают, что цирконовые покрытия позволяют уменьшить переохлаждение расплава и тем самым сократить продолжительность соприкосновения жидкого металла с покрытием, т. е. затормозить процесс химического взаимодействия.

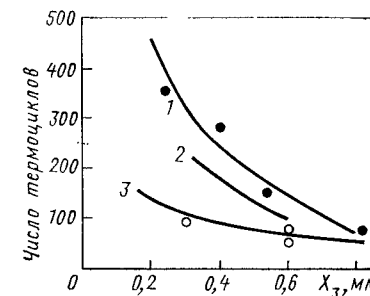
5. ПОСТОЯННЫЕ ТОНКОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Высокотемпературное напыление. Перспективным способом получения на стальных и чугунных кокилях постоянных покрытий является высокотемпературное напыление неметаллическими материалами. Такой способ нанесения покрытий включает две разновидности: плазменное и газопламенное. Обе разновидности имеют много общего; для них характерно слоистое строение напыленного слоя. Более высокая температура факела в первом случае (8000—25 000 К в сравнении с 2300 К) позволяет получать покрытия из любых тугоплавких материалов [147].

Обстоятельные исследования кокильных покрытий из Al_2O_3 и ZrO_2 , наносимых высокотемпературным напылением, были приведены А. М. Петриченко и Г. Н. Тулузовым. Полученные ими результаты сводятся к следующему. Для стабилизации те-

Рис. 39. Зависимость долговечности напыленных покрытий из Al_2O_3 от их толщины:

1 — покрытия с подслоем нихрома при порошковом напылении; 2 — покрытия с подслоем нихрома при стержневом напылении; 3 — покрытия без подслоя при порошковом напылении



трагональной разновидности ZrO_2 необходимо применять окислы щелочноземельных металлов. Стабилизирующее действие на кристаллическую разновидность ZrO_2 оказывает Na_2O , содержащаяся в жидком стекле. Поэтому для нанесения покрытия могут быть использованы стержни, состоящие из 75% ZrO_2 в порошке и 25% жидкого стекла. Однако при стержневом напылении чистота поверхности наносимого слоя хуже, чем при порошковом. В последнем случае шероховатость поверхности соответствует 4—5-му классам. В процессе работы шероховатость поверхности почти не изменяется. Долговечность покрытия падает по мере увеличения его толщины. Покрытия из ZrO_2 , наносимые на нихромовый подслой, более долговечны (рис. 39), чем покрытия из Al_2O_3 (280 и 170 термостоек в условиях эксперимента, $X_z = 0,4$ мм). Теплозащитные свойства первого покрытия заметно выше, чем второго.

Авторы работы [111] для плазменного напыления кокилей применяли порошки Al_2O_3 и ZrO_2 , стабилизированные CaO . При этом наносили подслей из алюминид никеля, который получали напылением никельалюминиевого порошка из 20% Al и 80% $(Ni + P)$ с 1,2—1,8% P . В напыленном слое между Al и Ni возникает реакция, приводящая к образованию нитерметаллида $NiAl$. Это соединение имеет большую плотность и прочно связывается с основным металлом, увеличивает прочность сцепления керамических покрытий, повышает их термостойкость, защищая основной металл от образования окалин.

Приведенные в работе [111] результаты исследований показали, что толщина подслоя должна составлять примерно 0,2 мм. Они подтвердили также, что покрытие из ZrO_2 имеет более высокую термостойкость, чем покрытие из Al_2O_3 . Из анализа этих результатов следует, что долговечность слоя окислов снижается, если его толщина более 0,5—0,6 мм.

Плазменное напыление стальных и чугунных кокилей для производства чугунных отливок получило практическое воплощение в разработках НИИСЛА [145]. Покрытие из окиси алюминия наносит как на новые, так и на бывшие в эксплуатации кокили. Поверхности подвергают тщательной пескоструйной очистке, жировые пятна не допускаются. Не позднее, чем через 2—3 ч,

после такой подготовки на поверхность электрометаллизаторами ЭМЗ, ЭМ9 и ЭМ10 наносят подслоя толщиной до 0,05 мм. В качестве материала подслоя применяют нихром или сталь 12Х18Н9Т.

Перерыв между нанесением подслоя и плазменным напылением не должен превышать одни сутки. Слой из Al_2O_3 напыляют с толщиной 0,3—0,4 мм. На плазменное покрытие наносят обычные краски или ацетиленовую копоть.

Данный технологический процесс прошел промышленную проверку при производстве из серого чугуна отливок подшипниковых щитов электродвигателя и тормозных барабанов автомобиля «Москвич» [112]. При этом установлено, что покрытие из Al_2O_3 выдерживает до 2000 заливок без изменений. В то же время на кокилях без напыления после 1500—2000 заливок образовывались трещины, исключающие возможность дальнейшей эксплуатации кокилей без ремонта.

Анодирование алюминиевых кокилей. Надежная термическая защита рабочей стенки формы — решающее условие применения алюминиевых кокилей для изготовления отливок из черных и цветных сплавов. Температура на внутренней поверхности алюминиевого кокиля $T'_{2п}$ не должна превышать 600—650 К, в противном случае кокиль подплавится и выйдет из строя.

В работе [21] показано, что одним из путей снижения $T'_{2п}$ в алюминиевом кокиле является создание на его рабочей поверхности анодированного слоя. Такой слой представляет собой постоянное покрытие, органически связанное с материалом кокиля. Анодированный слой обладает высокой температурой плавления (2323 К), большой твердостью (микротвердость составляет 400—500 кгс/мм²) и малой теплопроводностью (см. табл. 3). А. И. Вейником и В. Р. Ровкачом изучено анодирование алюминиевых сплавов АЛ9 и АЛ11, которые обладают высокими литейными и удовлетворительными механическими свойствами [24].

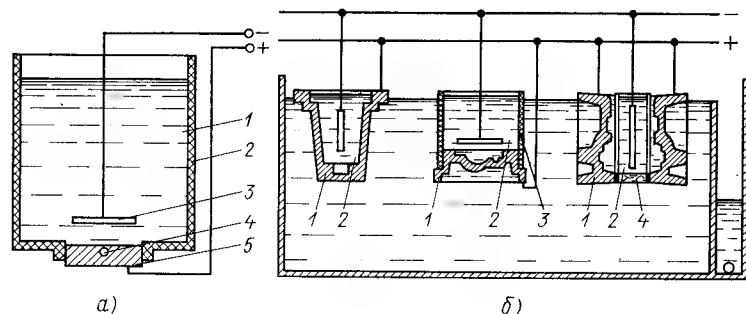


Рис. 40. Схема анодирования алюминиевого образца (а) и алюминиевых кокилей (б): а — 1 — электролит; 2 — ванна; 3 — электрод; 4 — место установки термопары; 5 — образец; б — 1 — кокиль; 2 — электролит; 3 — наставной кожух; 4 — деревянная заглушка

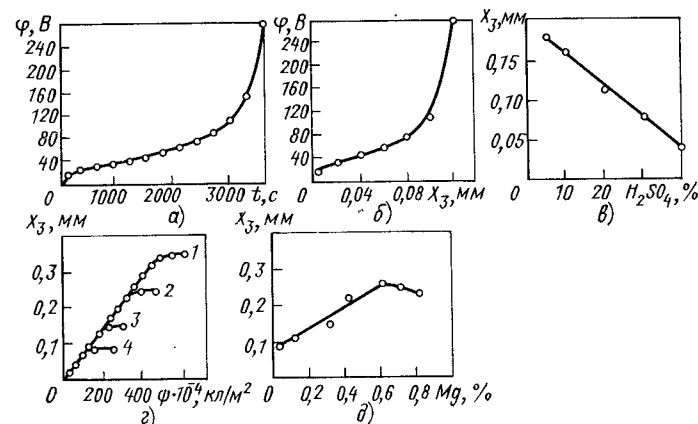


Рис. 41. Влияние различных факторов на процесс анодирования

Толщина анодной пленки зависит от многих факторов. С уменьшением температуры электролита толщина анодного слоя возрастает. Однако более важное значение имеет не температура электролита, а температура кокиля в зоне образования слоя. В связи с этим целесообразно охлаждать не ванну с электролитом, а анодируемое изделие. Схема процесса представлена на рис. 40, где анодируемый образец 5 подвергается снизу интенсивному охлаждению.

Влияние других факторов на процесс анодирования показано на рис. 41. Повышение напряжения сверх 100—120 В не способствует увеличению толщины покрытия X_3 . Процесс считается законченным, когда напряжение достигает 120 В (рис. 41, б). Влияние концентрации электролита видно на рис. 41, в: с увеличением концентрации H_2SO_4 толщина покрытия X_3 падает. Опытным путем установлено, что анодирование следует проводить при плотности тока 0,05—0,1 А/м², по мере роста X_3 плотность должна уменьшаться до 0,02—0,03 А/м².

Количество затраченного электричества Ψ непосредственно связано с толщиной пленки. На рис. 41, г кривые 1—4 относятся к электролиту с концентрацией серной кислоты соответственно 5, 10, 20 и 40%. Во всех случаях плотность тока равна 0,05 А/м², температура образца не выше 293 К, содержание магния в сплаве 0,7%. Эта примесь существенно влияет на X_3 (рис. 41, д).

Места кокиля, которые соприкасаются с электролитом, но не подлежат анодированию, окрашивают кислотостойким лаком ХВЛ-21 или АК-20. Катод делают из свинца; площадь его поверхности примерно в 10 раз меньше анодируемой площади. Температура электролита не должна превышать 293 К. Кокиль

перед анодированием обезжиривают вначале органическим растворителем, затем щелочным раствором и промывают водой.

Описанным методом получают покрытия толщиной 0,25—0,3 мм. Слой до 5 мм можно получить при кернении или фрезеровании защищаемой поверхности. Глубина фрезерования соответствует необходимой H_z , ширина канавок 0,25—0,5 мм, толщина гребешков 0,5 мм. Анодированные кокили в процессе эксплуатации защищают разовым или полупостоянным покрытием.

6. РАЗОВЫЕ ТОЛСТОСЛОЙНЫЕ ПОКРЫТИЯ (ОБЛИЦОВКИ)

Основой современной технологии литья в кокили с толсто-слойным покрытием (облицованные кокили) являются сыпучие смеси на фенолформальдегидном термотвердеющем связующем [143]. Именно на таких смесях работают в отечественной и зарубежной промышленности автоматизированные и комплексно-механизированные линии. В качестве минеральной основы смесей используют кварцевые пески 1К010 и 1К016 либо цирконовый концентрат; содержание связующего 2,0—3,0%.

Для облегчения съема облицованного кокиля с модели и повышения прочности отвердевшей облицовки рекомендуется вводить 0,05—0,2% стеарата кальция. Очистка кокиля от остатков выгоревшей облицовки облегчается при вводе в смесь 0,3—0,5% скрытокристаллического графита и 0,1—0,5% борной кислоты.

В связи с использованием пескодувного способа для нанесения облицовки песчано-смоляная смесь должна представлять собой плакированный песок. В пескодувном процессе механическая смесь склонна к сегрегации. Технология «холодного» и «горячего» плакирования подробно описана в специальной литературе.

Увлажненный плакированный песок имеет склонность к комкованию: смесь приобретает некоторую прочность при сжатии. Между влажностью и прочностью при сжатии существует почти линейная зависимость (рис. 42, а). Смесь не комкуется, если предел прочности при сжатии не превышает $0,2 \cdot 10^5$ Па. Влага снижает прочность смеси в отвердевшем состоянии. Предел прочности отвердевшей смеси при растяжении должен быть $10 \cdot 10^5$ — 15×10^5 Па (из совместной работы с Б. Н. Кобринской).

Отработанная песчано-смоляная смесь поддается регенерации путем прокаливании при 1120—1170 К в окислительной атмосфере [67]. Облицовочные смеси, изготовленные на прокаленном кварцевом песке, в отвердевшем состоянии обладают более высокой прочностью, чем смеси на свежем песке (рис. 42, б).

Механическую теплостойкость песчано-смоляных облицовок исследовали на специальной технологической пробе. Проба представляла собой пластину с пятимиллиметровым углублением.

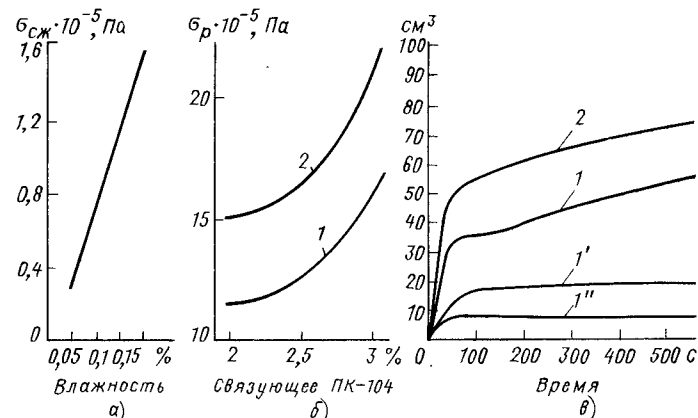


Рис. 42. Свойства облицовочной смеси и облицовки:

а — зависимость прочности при сжатии неотвердевшего плакированного кварцевого песка от содержания влаги; б — влияние термической обработки кварцевого песка на прочность при растяжении песчано-смоляной смеси в отвердевшем состоянии (1 — исходный песок; 2 — прокаленный песок); в — газотворная способность при нагреве облицовочной смеси, содержащей 3% связующего ПК-104 (кривые 1, 1' и 1'' при 1470, 1170 и 970 К соответственно), и смеси для оболочковых форм, содержащей 6% ПК-104 (кривая 2 при 1470 К)

Такая пластина обеспечивала жесткое защемление облицовки по контуру, что соответствует реальным условиям температурного нагружения. Облицовку нагревали с помощью двух силитовых стержней, расположенных в горизонтальной плоскости. Температура в межстержневом пространстве составляла 1620 К. После выдержки над стержнями в течение 30 с пробу охлаждали до комнатной температуры. Обгоревший слой с поверхности облицовки снимали мягкой кистью. Механическую теплостойкость оценивали по величине $П'_1$, обратной объему обгоревшей смеси.

На рис. 43 приведены результаты, полученные в опытах с различными облицовками. Отчетливо видно, что с увеличением содержания связующего (применяли фенолформальдегидную смолу ПК-104) механическая теплостойкость существенно возрастает, причем увеличение теплостойкости больше, чем увеличение прочности при стандартном испытании на разрыв. Влияние же стеарата кальция не существенно. Теплостойкость облицовки, определенная по описанной методике, весьма чувствительна к концентрации отвердителя смолы-уротропина: с увеличением концентрации теплостойкость падает. Аналогично изменяется и прочность при нормальной температуре (рис. 43, в).

Изменение степени твердения облицовки в условиях испытаний достигается различной температурой металлической части образца при постоянном времени твердения (60 с). Опыты показали, что недоотвердевшая облицовка, независимо от минеральной

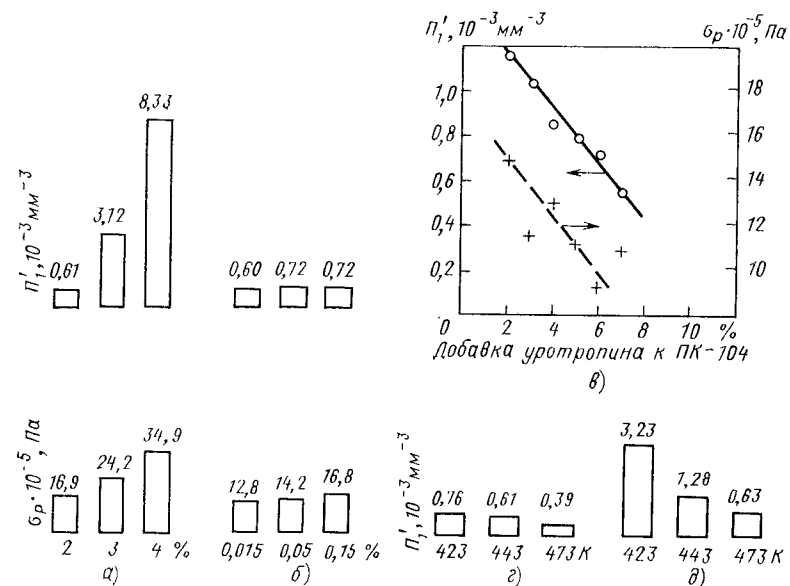


Рис. 43. Влияние концентрации связующего (а), стеарата кальция (б), добавки уротропина к связующему ПК-104 (в), степени отвердевания облицовочной смеси на кварцевом (г) и дистеисиллиманитовом песке (д) на прочность σ_p и механическую теплостойкость P_1' облицовки

основы, имеет повышенную механическую теплостойкость (рис. 43, г, д). Объясняется это пластическим течением не полностью «сшитого» полимерного связующего и релаксацией температурных напряжений.

Дилатометрическими исследованиями установлено, что температура, при которой песчано-смоляная облицовка полностью теряет прочность, составляет 670—770 К. И этот показатель теплостойкости мало зависит от концентрации связующего, породы и зернистости минеральной основы [50].

Таким образом, показатели механической теплостойкости зависят от методики испытания. Целесообразность использования тех или иных показателей зависит от конкретных условий работы покрытия.

Данные о термохимических свойствах песчано-смоляных облицовок приведены в виде графика на рис. 42, в и в табл. 6. Кривые выражают газотворную способность при прокаливании в «собственной» атмосфере 2 г отвердевшей смеси. С увеличением температуры пиролизная окислительная способность газовой фазы по отношению к железу падает [68].

Таблица 6

Состав газов, выделяющихся при нагреве в «собственной» атмосфере облицовочной смеси, содержащей 3% связующего ПК-104

Температура нагрева, К	Содержание газов, %						
	CO ₂	C ₁₁ H _{2n}	O ₂	CO	H ₂	C _n H _{2n+2}	N ₂
970	1,7	—	18,9	8,6	22,9	—	48,0
1170	6,0	—	6,2	11,0	22,8	3,6	48,9
1470	2,3	0,2	1,0	22,6	40,0	3,3	30,9

В отдельных случаях в качестве облицовок кокилей применяют жидкие самотвердеющие, пластичные холоднотвердеющие и керамические смеси. Рецептуры таких смесей и их термофизические, термомеханические и термохимические свойства аналогичны составам, применяемым для получения объемных литейных форм, поэтому соответствующие сведения могут быть почерпнуты из обширной специальной литературы. Конкретные данные относительно тех нессыпучих смесей, которые нашли применение в практике литья в облицованные кокили, приводятся в гл. XVIII. При этом основное внимание уделяется технологическим свойствам составов как облицовочных материалов.

КАЧЕСТВО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Актуальность проблемы. В настоящее время в науке не существует объективных универсальных числовых методов оценки качества продукта (отливки, кокиля, литейного оборудования и т. д.) во всем возможном диапазоне изменения этой характеристики, начиная от полной непригодности продукта и кончая наивысшими его свойствами. Отсутствие универсальных критериев качества делает невозможным рациональное определение эффективности различных технологий и производств. Без универсальных методов оценки качества и эффективности невозможно сравнение различных продуктов, технологий, производств, отраслей и т. д. Все это сильно затрудняет долгосрочное планирование качества литья, эффективности литейного производства, выпуска нового более совершенного литейного оборудования, сроков физического и морального износа, ремонта и замены оборудования, масштабов подготовки и повышения квалификации литейщиков и т. п.

Как видим, проблема разработки универсальных методов оценки качества и эффективности является весьма актуальной для литейного производства. Не менее актуальна она и для всего народного хозяйства в целом.

Интересно отметить, что перед аналогичной проблемой сейчас стоят кибернетики. Для создания систем автоматизированного проектирования технологических процессов литья необходимо располагать универсальными критериями качества и эффективности, с помощью которых можно было бы в единообразной, удобной для сравнения форме оценивать квалификацию персонала, совершенство оборудования, качество продукта и исходных материалов, организацию производства, экономические показатели и т. д. Без таких оценок автоматизированные системы проектирования эффективно работать не могут.

Анализ показывает, что на современном уровне развития наших знаний проблема разработки универсальных критериев качества и эффективности вполне разрешима. Решение следует искать на пути максимального обобщения имеющихся данных, максимального абстрагирования от конкретной физической обстановки изучаемого явления. Соответствующее решение, сопровождаемое многочисленными примерами практических расчетов из области кокильного литья, излагается на с. 96—168.

Тем самым закладывается фундамент для создания систем автоматизированного проектирования литейной технологии. Некоторые соображения, посвященные этому вопросу, приводятся на с. 168—183, где обсуждаются традиционные

конкретные методы применения ЭВМ при литье в кокиль и говорится о перспективах развития методов обобщенного автоматизированного проектирования.

Общая теория систем. Идеи обобщения и абстрагирования не новы, они многократно высказывались многими исследователями. В наиболее четком виде эти идеи были сформулированы в так называемом системном подходе — одном из основных методов материалистического познания природы. Например, в настоящее время в науке интенсивно разрабатывается общая теория систем, зародившаяся еще в тридцатых годах нашего столетия. Одним из основоположников этой теории является биолог-теоретик Л. Берталанфи. Это новое направление имеет целью связать в единую теорию некую совокупность философских, методологических, конкретно-научных и прикладных проблем анализа и синтеза сложных систем произвольной природы. Основой теории должен служить изоморфизм (аналогичность) явлений различного рода — технических, биологических, экономических, социальных. Благодаря изоморфизму полученные знания можно переносить из одной области в другую.

Решение поставленной Л. Берталанфи проблемы сейчас ищут в самых различных направлениях, пытаясь максимально абстрагироваться от конкретной физической природы изучаемой системы и описать ее свойства на лингвистическом, теоретико-множественном, абстрактно-алгебраическом и т. д. уровнях. Однако перед создателями общей теории систем встали непреодолимые трудности. Пока удалось решить лишь отдельные частные задачи, в которых применен так называемый системный подход, позволяющий рассматривать различные явления — технические, экономические, социальные, экологические и т. д. — в их взаимной связи.

Основная суть идей абстрагирования и изоморфизма достаточно хорошо сформулирована в общей теории систем. Но путь, на котором в этой теории пытаются найти решение поставленной проблемы — от математических абстракций к конкретной физической системе — явно не перспективен. Поэтому мы пойдем в прямо противоположном направлении — от конкретной системы к абстракциям, в фундаменте которых таким образом будут уже находиться предпосылки не математической, а физической природы [26, с. 19]. Такой путь весьма плодотворен, он лежит через известные теории подобия, аналогии, термодинамики необратимых процессов, информации и философии.

Теория подобия. Необходимые начальные основания для выбора универсальных критериев качества и эффективности можно найти в теории подобия. Эта теория возникла при изучении процессов гидродинамики и теплообмена. Она позволяет свойства единичного (конкретного) явления распространить на группу (бесконечное множество) подобных между собой явлений. Подобными

считаются явления, характеризующиеся одинаковыми значениями критериев подобия.

В свою очередь критерии подобия представляют собой безразмерные степенные комбинации (комплексы) конкретных характеристик данного физического явления. Эти комплексы находятся из дифференциальных уравнений и условий однозначности, описывающих явление, по определенным правилам, например путем деления всех слагаемых уравнения на одно из них. Одинаковые значения любого критерия могут быть получены с помощью бесчисленного множества комбинаций входящих в него конкретных величин. Именно эти комбинации конкретных величин и образуют группу подобных между собой явлений [25, с. 261], [26, с. 156]. Критерии подобия иногда могут быть найдены также методами теории размерностей, но этот путь обычно крайне ограничен.

Связи между существенными для явления критериями подобия устанавливаются теоретически или экспериментально. На практике это может быть сделано для какого-нибудь одного конкретного частного явления. Но выраженные в критериях подобия конкретные связи приобретают смысл обобщенных зависимостей, справедливых для всех без исключения подобных явлений.

Такой подход резко сокращает число потребных для расчетов технологии исходных данных. Он представляет собой первый (начальный) шаг на пути абстрагирования от конкретных свойств изучаемых явлений.

Как видим, в аппарате теории подобия заключены чрезвычайно ценные возможности обобщений. Поэтому теория подобия может и должна быть положена в основание универсальных методов расчета качества и эффективности. Однако ограничиться одной теорией подобия мы не можем, так как она еще недостаточно универсальна. В частности, ни одна группа подобных явлений обычно не охватывает явлений различной физической природы.

Теория аналогии. Следующий шаг в развитии идей универсальности позволяет сделать теория аналогии. Она целиком базируется на теории подобия, но при этом значительно расширяет возможности последней. Теория аналогии распространяет найденные критерии подобия на явления различной физической природы. Это становится возможным в тех случаях, когда разнородные явления описываются дифференциальными уравнениями одного и того же вида. Например, сходные (аналогичные, изоморфные) дифференциальные уравнения переноса получаются при описании явлений теплопроводности, электропроводности, диффузии фильтрации и т. д. Благодаря этому обобщенные законы, найденные для одних явлений, например гидравлических, можно с успехом распространять на все остальные явления, описываемые аналогичными дифференциальными уравнениями [25, с. 277], [26, с. 157]. Таким образом, в теории аналогии каждая группа подоб-

ных явлений обобщается на несколько неодинаковых по физической природе групп. Благодаря этому совершается второй исключительно важный для всего последующего шаг на пути изоморфизма и абстрагирования от конкретной физической природы изучаемых явлений.

Однако и этого обобщения для нас недостаточно. Дело в том, что дифференциальные уравнения, которыми обычно оперирует теория аналогии (и подобия), сами по себе еще недостаточно универсальны и, что особенно важно, не содержат сведений о взаимном влиянии явлений различной физической природы. Идея взаимного влияния — это центральная идея, без которой невозможен одновременный и успешный учет при расчетах всех существенных для качества отливки и эффективности производства обстоятельств технологического процесса.

Термодинамика необратимых процессов. Наиболее универсальные уравнения содержатся в термодинамике необратимых процессов. Например, первому началу термодинамики — закону сохранения энергии — подчиняется все сущее. Кроме того, основу закона переноса Онзагера составляет принцип взаимного влияния явлений различной физической природы. Количественная сторона взаимного влияния определяется законом увлечения Онзагера [25, с. 233], [26, с. 203].

Следовательно, в сочетании теории подобия, обладающей мощными средствами обобщения имеющихся данных, теории аналогии, вовлекающей в сферу обобщений теории подобия разнородные явления, и термодинамики необратимых процессов, которая опирается на предельно универсальный аппарат исследования, позволяющий рассматривать все явления природы в их взаимной связи, можно видеть ключ к решению поставленной задачи: успешно преодолеть трудности, связанные с разработкой универсальных методов расчета качества и эффективности.

Здесь важно подчеркнуть, что при таком подходе необходимое развитие идей абстрагирования и изоморфизма достигается не математическими, а сугубо физическими методами, в основе которых лежит опыт, многовековая практика, что является важным преимуществом новой теории [26, с. 19], [32, с. 7].

Теория информации. На пути абстрагирования и изоморфизма повышению универсальности критериев подобия, поставляемых термодинамикой необратимых процессов, много способствует теория информации. Например, очень полезными оказываются ее терминология и то широкое понимание информации, которое принято считать интуитивным. Благодаря такому пониманию хорошо проясняется глубинная сущность новых критериев качества и эффективности и рождается удобный для практики метод числового определения этих критериев.

Информационные представления настолько емки и многозначны, что позволяют легко вовлечь в сферу действия теории такие разнородные особенности технологии, как качество исходных материалов, кокиля и отливки, совершенство оборудования, квалификация литейщика, организация производства и т. п. [27—33].

Таким образом, применение идей теории информации дает возможность подняться на следующую ступень обобщения.

Философия. Завершающий шаг в развитии идей абстрагирования и изоморфизма позволяет сделать философия. Она оперирует такими предельно общими и универсальными понятиями, как материя и движение, количество и качество материи, количество и качество движения. Посредством термодинамики эти понятия накладывают свой отпечаток на структуру критериев качества и эффективности. Например, на простейшем уровне эволюционного развития поведение материи сводится к тепловому, механическому, химическому, электрическому, магнитному и тому подобным явлениям. Термодинамика для оценки количества поведения на этом уровне использует энергию, а на более высоком уровне — понятия, которые предоставляет ей теория информации. В результате, благодаря философии, происходит взаимное обогащение термодинамики и теории информации, а критерии качества и эффективности приобретают максимальную степень универсальности [27—33].

Все сказанное рисует общую картину последовательности развития идей абстрагирования и изоморфизма с целью построения термодинамической теории качества и эффективности. Эта картина хорошо перекликается с идеями Л. Берталанфи, но ее основу составляют абстракции совсем другого плана — не математические, а физические. Математика послужит лишь тем языком, с помощью которого будут оформлены эти все идеи. Приступим теперь к реализации намеченной программы.

2. ВЫВОД УНИВЕРСАЛЬНЫХ КРИТЕРИЕВ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОСТИ

Закон сохранения энергии. Энергия играет исключительно важную роль в народном хозяйстве. Для инженера она имеет не менее существенное значение, ибо на производство любого конкретного продукта затрачивается некоторая энергия. Таким продуктом может быть отливка, кокиль, литейное оборудование, шихтовые материалы и т. п. Необходимая для производства энергия заимствуется из соответствующих источников. К последним относятся также люди и животные. В результате готовый продукт, например отливка, является «носителем» (этот термин употребляется в условном смысле, что станет ясно из дальнейшего) определенного количества затраченной энергии, которая в значительной степени характеризует стоимость продукта.

Отсюда понятно стремление ученых использовать энергию или мощность для оценки всевозможных технологических процессов [4]. Соответствующий термодинамический подход применительно к различным отраслям народного хозяйства был разработан американскими экономистами во главе с В. Леонтьевым и Х. Ченери [152]. Позднее этот метод был развит П. Кузнецовым и распространен на мировую экономику как большую систему, поддающуюся управлению.

В соответствии со сказанным, расход энергии при производстве некоторого продукта определяется с помощью следующего известного уравнения закона сохранения энергии:

$$dU = \sum_{i=1}^{i=n} dQ_i, \quad (69)$$

где dQ_i — элементарные затраченные работы различного рода: тепловая, механическая, электрическая, химическая, магнитная, мускульная и т. д., Дж.

Суммирование с помощью уравнения (69) всех n затраченных работ дает полную энергию U (Дж). Готовый продукт является носителем этой энергии.

Новое уравнение закона. Описанный термодинамический метод, основанный на использовании уравнения (69), оказался, как уже отмечалось, исключительно плодотворным при оценке отдельных технологических процессов, целых отраслей народного хозяйства и даже всей мировой экономики. В частности, в монографии [177] с помощью энергии решаются глобальные проблемы развития общества с учетом промышленного потенциала, уровня сельскохозяйственного производства, природных ресурсов, климатических условий.

Однако в подобного рода энергетическом подходе можно усмотреть один весьма важный недостаток, имеющий принципиальное значение, — уравнение (69) не учитывает квалификацию персонала и совершенство технологии в смысле возможностей производства продуктов высокого качества. Иными словами, одну и ту же по величине работу могут совершить высококвалифицированный или необученный персонал и высокоэффективное прецизионное или очень грубое оборудование. Ясно, что конечный результат будет не одинаковым: в первом случае качественные и количественные характеристики производства будут существенно выше, чем во втором. Качество и количество продукта не в последнюю очередь зависят от квалификации персонала и уровня развития технологии.

Отмеченное обстоятельство может быть учтено путем введения в уравнение (69) специального множителя Π , именуемого энергиялом и отражающего влияние на свойства продукта степени совершенства затраченной работы (энергии). Имеем [27, с. 91], [28, с. 10]

$$dW = \Pi dU = \sum_{i=1}^{i=n} \Pi_i dQ_i, \quad (70)$$

где W — так называемая информэнергия, Дж (смысл этого названия станет ясен из дальнейшего); Π — среднее значение энергияла продукта; Π_i — значение энергияла, соответствующее затраченной работе dQ_i .

В конкретном частном случае при $\Pi = \Pi_i = 1$ из этого уравнения получается известное (69). Уравнение (69) выражает закон сохранения энергии, новое уравнение (70) — закон сохранения информэнергии.

Требуется установить физический смысл величин U , W и Π , входящих в уравнения (69) и (70). Это позволит более детально

познакомиться с существом явлений, определяемых этими уравнениями.

Энергия. Для начала необходимо очень четко определить роль, которую играет энергия в методе Ченери—Кузнецова—Одума и новом уравнении (70).

В методе Ченери—Кузнецова—Одума понятие энергии и уравнение (69) несут дополнительную смысловую нагрузку, связанную с необходимостью оценки различных технологических процессов. Энергия становится некоей условной характеристикой этих процессов.

Действительно, надо отдавать себе ясный отчет в том, что продукт (система) не всегда несет в себе энергию, которая была затрачена на его производство. В реальных условиях затраченная, например при литье или механической обработке, энергия содержится в продукте не в прямом, а в переносном, косвенном, трансформированном, условном смысле. Эта энергия в процессе производства лишь помогает придать продукту нужные потребительские свойства. Поэтому в действительности продукт сохраняет (несет в себе) не саму затраченную энергию, а именно эти полученные извне с помощью энергии потребительские свойства. Например, при литье, в процессе подвода (затраты) теплоты металл расплавляется и затем приобретает в форме необходимую конфигурацию. Но конечный продукт — отливка вовсе не сохраняет затраченную на расплавление металла теплоту, т. е. не остается навечно в жидком состоянии. В результате осуществления технологического процесса отливка фактически оказывается носителем не энергии (теплоты), а соответствующих конфигурации и других интересующих инженера полезных свойств.

Таким образом, при оценке технологических процессов известное уравнение (69) призвано определять не только энергетические затраты, как в термодинамике (назовем соответствующие явления термодинамическими), но и потребительские свойства продукта (назовем соответствующие явления технологическими). Другими словами, в методе Ченери уравнение (69) характеризует искусственно расширенный класс явлений, включающий в себя как термодинамические, так и технологические явления.

Однако выше уже отмечалось, что сама по себе энергия не в состоянии однозначно определить свойства персонала, продукта и технологии. Поэтому с целью устранения указанного недостатка было сформулировано новое уравнение (70), специально предназначенное для технологических оценок. Это уравнение лежит в основании методов расчета качества и эффективности. В нем энергия играет тоже условную, но принципиально иную, чем в методе Ченери, роль.

Информэнергия. Причина того, что энергия не способна удовлетворительно выполнять возложенные на нее в методе Ченери

дополнительные функции — служить характеристикой квалификации персонала и качества продукта, — выясняется при более глубоком сравнительном термодинамическом анализе уравнений (69) и (70).

Ясно, что традиционное уравнение (69) относится к системе (продукту, объекту), которая способна общаться с окружающим миром (средой) только посредством теплоты, работы, электричества и т. д. Но теплота, работа, электричество — это самые простые формы движения материи, поэтому обсуждаемая система является наиболее простой, примитивной. Количественная сторона взаимодействия простой системы с окружающей средой оценивается энергией U .

Уравнение (70) относится к системе, которая в состоянии общаться с окружающим миром также иными, более сложными способами: на нее могут оказывать влияние квалификация персонала, совершенство оборудования и т. д. Поэтому эта система является более совершенной, чем предыдущая, она должна быть более высоко организованной. И количественная сторона взаимодействия такой сложной системы с окружающей средой определяется уже не энергией U , а информэнергией W .

Следовательно, информэнергия характеризует количественную сторону взаимодействия произвольной сложной системы с окружающим миром. При этом величина информэнергии значительно превышает величину энергии, ибо энергия сложной системы обычно много больше единицы. Энергия становится равным единице только в том единственном частном случае, когда рассматривается простая система. В этих условиях взаимодействие сводится к обмену теплотой, механической работой, электричеством и т. п., а новое уравнение (70) превращается в известное (69).

Как видим, при использовании уравнения (70) под системой в общем случае можно понимать любой объект — продукт, технологический процесс, завод, отрасль, персонал, общество, цивилизацию. Поведение такой системы может быть сколь угодно разнообразным и сложным; оно не обязано, как при использовании уравнения (69), сводиться только к обмену теплотой, работой, электричеством. Величина информэнергии сложной системы определяется либо путем умножения энергии U на среднее значение энергияла Π , либо путем суммирования работ, умноженных на соответствующие энергиялы.

Если система возникла в результате производственного процесса, как продукт определенной технологии, то ее информэнергия находится сравнительно просто с помощью уравнения (70) по известным значениям энергиялов и затраченных работ. Разумеется, для этого надо заранее установить энергиял каждой операции технологического процесса, а также уметь определять величину затраченной работы. Если же речь идет о такой сложной системе, как человек, общество и т. п., то задача существенно усложняется, ибо приходится принимать во внимание процессы научения, эволюции и т. д. (см. с. 147—168).

Во всех случаях при определении информэнергии абсолютное значение величины W найти очень трудно. Много проще установить ее изменение dW . Для практических целей этого оказывается вполне достаточно. Аналогичная ситуация наблюдается в термодинамике при определении энергии U . Абсолютное

значение величины U удастся найти только для гипотетического частного случая, когда речь идет об идеальном газе. Во всех остальных случаях приходится довольствоваться определением изменений энергии dU .

Энергиал. Дальнейший термодинамический анализ уравнений (69) и (70) позволяет установить физический смысл энергиала и обнаружить некоторые новые интересные свойства у энергии и информэнергии. С этой целью выражения, состоящие под знаками суммы, запишем следующим образом:

$$dQ_i = P_i dE_i; \quad (71)$$

$$dQ_{U_i} = \Pi_i dQ_i = \Pi_i dU_i. \quad (72)$$

Равенство (71) расшифровывает работу dQ_i , согласно классической термодинамике, в виде произведения интенсала (фактора интенсивности) P_i на изменение экстенсора (фактора экстенсивности) dE_i , причем интенсалами, как известно, служат абсолютная температура, давление, электрический и химический потенциалы и т. д., экстенсорами — энтропия, объем, электрический заряд, масса и т. п. Равенство (72) определяет так называемую информационную работу dQ_{U_i} , при этом $dU_i = dQ_i$.

Сравнение равенств (71) и (72) говорит о том, что в интересующем нас сложном технологическом явлении, подчиняющемся уравнению (70), энергиал Π и энергия U играют точно такую же роль, какую играют интенсал P и экстенсор E в обычном простом термодинамическом явлении (тепловом, механическом, электрическом, химическом, кинетическом и т. д.), подчиняющемся традиционному уравнению типа (69). Отсюда величина Π получила наименование энергиала, а U — энергиора.

Отмеченное принципиальное сходство в структуре уравнений (69) и (70), (71) и (72), а также между энергиалом Π и интенсалом P , энергией U и экстенсором E не является случайностью. Оно с самого начала было положено в основу построения нового явления, описываемого уравнением (70).

Действительно, новое технологическое явление (70) было найдено известными термодинамическими методами по особым правилам, аналогичным правилам выбора потоков и сил Онзагера. В частности, согласно этим правилам, произведение интенсала на экстенсор должно иметь размерность энергии (Дж) [22, с. 22], [23, с. 235], [26, с. 97]. По этой причине информэнергия, равная произведению энергиала на энергиора, измеряется в Джоулях и, следовательно, энергиал должен быть величиной безразмерной. Более подробно способ выбора нового явления описан в работах [30] и [32].

Согласно тем же термодинамическим правилам, явление, описываемое некоторыми сопряженными между собой интенсалом и экстенсором, в принципе может иметь сложную физическую природу и быть в какой-то мере условным. Эта условность не отражается на возможности применения к нему известных основных законов термодинамики [23, с. 49, 231], [26, с. 99, 123].

Обсуждаемое сложное технологическое явление, подчиняющееся уравнению (70), есть явление условное [30, с. 44]. Степень и характер этой условности будет выясняться по мере расшифровки смысла величин U , W и Π . С целью определения и уточне-

ния конкретного содержания указанных величин надо прежде всего вспомнить наиболее характерные свойства интенсалов и экстенсоров.

Из термодинамики известно, что интенсал представляет собой фактор интенсивности, он определяет активность, напряженность, интенсивность данной формы движения материи, а также служит движущей причиной (силой) переноса (изменения) экстенсора. Экстенсор переносится под действием разности интенсалов. Например, электрический потенциал характеризует активность, напряженность, интенсивность электрической формы движения материи, электродвижущую силу, под действием разности потенциалов переносится электрический заряд.

То же самое можно сказать о давлении и объеме. Аналогичная картина наблюдается в тепловых, химических, магнитных и других явлениях.

Следовательно, энергиал Π , будучи интенсалом, представляет собой характеристику активности, напряженности, интенсивности некоего нового технологического явления, он служит движущей причиной переноса энергии, играющей роль экстенсора в этом явлении. Энергия переносится под действием разности энергиалов $\Delta\Pi$.

Явление, описываемое уравнением (70), заключается в подводе к системе или отводе от нее энергии под действием разности энергиалов. Совершаемая при этом так называемая энергетическая работа (72) сопоставляется в уравнении (70) с изменением информэнергии. Система (продукт) считается носителем этой информэнергии. Но в действительности система оказывается носителем только тех свойств, которые определяются величиной энергиала Π .

В рассматриваемом новом технологическом явлении, подчиняющемся уравнению (70), весьма замечательно то, что любые нужные свойства Π сообщаются продукту посредством определенных энергетических затрат. Благодаря этому перед инженером открывается исключительно богатая перспектива возможность обсуждать процесс производства в энергетических терминах и применять к его анализу крайне эффективный аппарат термодинамики необратимых процессов. Именно в этом и заключается суть предлагаемого метода. Что же касается упомянутой условности изучаемых технологических явлений, то на количественных соотношениях она не отражается и поэтому для нас принципиального значения не имеет.

Универсальный критерий качества. Полученные результаты (понятия простой и сложной системы, информэнергия и закон ее сохранения, энергиал, энергиор и т. д.) служат фундаментом для дальнейших чрезвычайно важных и далеко идущих обобщений. Благодаря этим обобщениям удастся расшифровать сущность основных понятий теории, пока еще не до конца выясненную, и

установить особую и при том центральную роль энергияла во всех технологических явлениях.

Для начала надо обратить внимание на тот факт, что энергиял представляет собой отношение двух характеристик, обладающих одинаковыми размерностями, т. е. [уравнение (70)]

$$\Pi = \frac{W}{U}. \quad (73)$$

Следовательно, энергиял есть величина безразмерная, или критерий подобия.

Далее уместно вспомнить, что энергиял служит интенсификатором. В обобщенном плане обычный интенсификатор (температура, давление, электрический и химический потенциалы и т. д.) характеризует специфические особенности (структуру, качество) термического, механического, электрического, химического и тому подобного поведения системы. Сама же система, способная только к такого рода поведению, является наиболее простой, примитивной, она находится на самой низкой ступени эволюционного развития. Поэтому интенсификатор есть специфическая мера качества поведения предельно простой системы.

В противоположность этому энергиял определяет структуру, качество поведения реальной сложной системы, находящейся на произвольном уровне эволюционного развития. При этом с помощью энергияла в единообразной, универсальной форме оценивается степень совершенства работ различного рода. Значит, энергиял есть универсальная мера качества поведения сложной системы.

Это свойство энергияла можно очень хорошо пояснить, если с обобщенных позиций взглянуть на соотношение (73).

Действительно, энергия, входящая в равенство (73), как уже отмечалось, с количественной стороны определяет возможности поведения любой простой системы. Поэтому энергия есть универсальная мера количества поведения системы, находящейся на начальном уровне эволюции.

Информэнергия характеризует количество поведения, которым располагает любая реальная система с произвольным уровнем сложности ее организации. Значит, информэнергия — это универсальная мера количества поведения сложной системы, находящейся на любой ступени эволюционного развития.

Следовательно, энергиял, равный отношению информэнергии к энергии, определяет уровень эволюционного развития поведения системы, степень совершенства этого поведения, рассматриваемого в сравнении с простой системой, у которой степень совершенства поведения равна единице ($\Pi = 1$). В энергиял раз количество поведения сложной системы выше, чем количество поведения простой.

Иными словами, энергиял, является предельно универсальным критерием подобия, который самым общим образом характеризует способ, структуру, качество поведения любой реальной системы. Это поведение определяется уровнем эволюционного развития системы и проявляется в ее взаимоотношениях с окружающим миром, с другими системами [28, с. 11].

В нашем случае, если речь идет о производственном процессе, то энергиял характеризует квалификацию персонала, уровень

развития технологии, совершенство взаимоотношений между персоналом, технологией и производимым продуктом, потребительские свойства продукта и т. д. В свою очередь, продуктом могут служить квалификация персонала, технологический процесс, организация производства и т. п.

Как видим, при внимательном обобщенном рассмотрении проблемы энергиял раскрывает перед нами свои весьма замечательные свойства, которые можно выразить следующими словами: качество, ценность, совершенство, квалификация, способность, активность, творческий потенциал и т. д. Все эти слова в одинаковой мере справедливы для оценки продукта, технологии, организации производства, отрасли, экономики, человека, образования и т. п., они вполне поддаются обобщению в виде единого понятия качества, и, следовательно, технологическое явление с полным правом можно именовать также явлением качества.

Не может быть никаких сомнений в том, что именно такими свойствами должен обладать универсальный критерий качества, предназначенный для расчета литейной технологии. Возможность дать с помощью энергияла объективную числовую оценку качества персонала, технологии и продукта имеет исключительно важное теоретическое и практическое значение.

Универсальные критерии эффективности. Качество продукта, например отливки, еще не является исчерпывающей характеристикой технологического процесса. При одном и том же достигнутом качестве расходы (затраты) рабочей силы, оборудования, материалов, энергии и т. д. могут быть самыми различными. Уровень этих затрат характеризует эффективность технологии.

Чтобы иметь возможность достичь высокой эффективности, т. е. производить данный продукт с наименьшими затратами, необходимо прежде всего научиться давать объективную числовую оценку этой чрезвычайно важной характеристике технологического процесса. Соответствующие универсальные критерии эффективности могут быть найдены на основе идей термодинамики необратимых процессов.

В общем случае в термодинамике различают покой и движение, состояния и изменения состояний, свойства и процессы изменения этих свойств. В соответствии с этим необходимо и достаточно сформулировать всего два различных типа критериев, которые определяли бы эффективность достижения нужных состояний (свойств) и эффективность реализации нужных процессов изменения состояний (изменения свойств). В совокупности оба типа критериев должны дать исчерпывающую характеристику эффективности любого технологического процесса.

Здесь мы ограничимся рассмотрением лишь самых простых критериев, представляющих собой отношение двух величин (параметров) одной и той же размерности. Такого рода критерии име-

нуются параметрическими. Кстати, энергиял — это тоже параметрический критерий. Параметрические критерии очень удобны для оперативного ввода в ЭВМ.

Заметим, что, согласно теории подобия, любая комбинация критериев является критерием подобия. Поэтому из рассмотренных простейших критериев могут быть составлены и более сложные. Не исключены и другие варианты составления сложных критериев эффективности.

В соответствии с методами термодинамики необратимых процессов первый тип критериев конструируется в виде отношения, числитель которого выражает некое идеальное, теоретически минимально необходимое, потребное свойство $C_{т\ ij}$, а знаменатель — реально необходимое свойство $C_{р\ ij}$. Имеем [28, с. 16].

$$\eta_{1\ ij} = \frac{C_{т\ ij}}{C_{р\ ij}}. \quad (74)$$

Другой вариант первого типа критериев содержит в числителе реально необходимое свойство $C_{р\ ij}$, а в знаменателе — фактически затраченное, имеющееся в наличии свойство $C_{н\ ij}$. Получаем

$$\eta_{2\ ij} = \frac{C_{р\ ij}}{C_{н\ ij}}. \quad (75)$$

Нетрудно видеть, что произведение обоих этих критериев представляет собой некий третий критерий, дающий определенную суммарную оценку эффективности, т. е.

$$\eta_{3\ ij} = \eta_{1\ ij} \eta_{2\ ij} = \frac{C_{т\ ij} C_{р\ ij}}{C_{р\ ij} C_{н\ ij}} = \frac{C_{т\ ij}}{C_{н\ ij}}. \quad (76)$$

Перечисленные критерии первого типа определяют состояния (свойства) продукта (системы).

Критерии второго типа должны характеризовать потери свойств в процессах переноса. Эти критерии могут быть получены в виде отношения двух одинаковых свойств на выходе из системы ($C_{вых\ ij}$) и на входе в нее ($C_{вх\ ij}$). Находим [27, с. 95], [29, с. 37]

$$\eta_{4\ ij} = \frac{C_{вых\ ij}}{C_{вх\ ij}} = \frac{C_{вх\ ij} - \Delta C_{ij}}{C_{вх\ ij}} = 1 - \frac{\Delta C_{ij}}{C_{вх\ ij}}, \quad (77)$$

где ΔC_{ij} — потери данного свойства в системе или соответствующем звене технологической цепи; $\Delta C_{ij} = C_{вх\ ij} - C_{вых\ ij}$.

Критерии (74)–(77) составляются для каждого j -го существенного свойства и для каждого i -го звена технологического процесса. Под C в общем случае можно понимать самые разнообразные свойства системы. В частности, это может быть качество (энергиял), информэнергия, энергия, время, масса, температура, размер, цвет, запах и т. д. Благодаря этому критерии (коэффициенты) η характеризуют самые различные стороны эффективности

использования персонала, оборудования и материалов, а также степень совершенства технологии, организации производства, системы управления производством и т. п.

Наиболее совершенным считается процесс, обеспечивающий заданное качество продукта при наивысших значениях критериев эффективности. В каждом конкретном случае степень важности тех или иных свойств продукта, тех или иных критериев эффективности учитывается путем введения смысловых значений понятия качества (с. 165).

Таким образом, если под качеством продукта, например отливки, понимаются какие-то его абсолютные свойства, то под эффективностью технологического процесса разумеются свойства, рассматриваемые в сравнении с заданными нормативными, минимально или максимально возможными, начальными или конечными свойствами. В результате с помощью критериев эффективности исчерпывающе характеризуются приобретения и потери свойств в процессах производства и эксплуатации продукта, а также сравнительный уровень затрат квалифицированного труда, оборудования, материалов, энергии и т. д. Возможность такой оценки имеет исключительно важное теоретическое и практическое значение. В совокупности критерии качества и эффективности однозначно и полностью определяют все стороны любого производственного процесса.

3. УРАВНЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КАЧЕСТВА КОКИЛЯ И ОТЛИВКИ

Постановка задачи. Найденные универсальные критерии качества и эффективности используют в дальнейшем для расчетов технологии литья в кокиль. В частности, будут рассмотрены методы расчета качества кокиля в процессе его проектирования, изготовления, хранения и эксплуатации; способы определения качества отливки, совершенства литейного оборудования и квалификации персонала; будет также дана оценка эффективности технологии литья в кокиль по сравнению с другими видами литья.

С целью выполнения указанных расчетов требуется вывести соответствующие уравнения, связывающие в единое целое все перечисленные параметры производственного процесса. Вывод необходимых уравнений крайне облегчается благодаря следующей замечательной особенности критериев качества и эффективности: все они выбраны в полном соответствии с правилами термодинамики необратимых процессов, причем в явлениях качества роль экстенсора играет энергия, а роль интенсификатора — критерий качества. Это значит, что при решении интересующей нас проблемы применимы все законы и уравнения термодинамики и разработанные в этой дисциплине методы.

В настоящем параграфе кратко рассмотрены необходимые для технологических расчетов уравнения и методы термодинамики. Главное внимание обращено на специфику, которую приносит в расчеты явление качества. Особенности явления качества и процессов литья в кокиль вынуждают также разработать специальные методы расчета соответствующих технологических цепей (см. 119—147). Для использования этих методов на практике требуется знать числовые значения всех коэффициентов, входящих в расчетные формулы, и прежде всего — универсального критерия качества. Метод определения критерия качества приводится в параграфе 6.

Выведенные уравнения, разработанные методы расчетов и числовые значения необходимых коэффициентов и критериев применяются при оценке качества и эффективности реальных процессов литья в кокиль — параграфы 4—6.

Исходные дифференциальные уравнения. Первой и самой важной расчетной формулой служит дифференциальное уравнение (70), которое в предыдущем параграфе было записано для общего случая, когда система располагает n степенями свободы.

Для одной степени свободы ($n = 1$) из уравнения (70) получаем

$$dW = dQ_U = \Pi dU = \Pi dQ = \Pi P dE.$$

Второй важнейшей расчетной формулой служит традиционное уравнение закона сохранения энергии (69). Это уравнение записано для n степеней свободы системы.

При $n = 1$ уравнение сохранения энергии имеет вид

$$dU = dQ = P dE.$$

Кроме энергии, в сложном явлении качества экстенсорами служат также масса, электрический заряд и т. д. Поэтому иногда приходится составлять также соответствующие уравнения сохранения массы, электрического заряда и других экстенсоров. Уравнения баланса всех этих экстенсоров содержат необходимые дополнительные связи между параметрами технологического процесса, которые могут потребоваться при решении различных практических задач.

Третье уравнение — состояния [24, с. 11], [25, с. 236] — применительно к явлению качества (при $n = 1$) выражает энергиял в функции энергии, т. е.

$$\Pi = f(U)$$

или в дифференциальной форме

$$d\Pi = A dU, \quad (78)$$

где A — коэффициент состояния качества;

$$A = \frac{d\Pi}{dU}.$$

Коэффициент состояния A обратен емкости K (Дж) системы по отношению к энергии, т. е.

$$K = \frac{1}{A} = \frac{dU}{d\Pi}. \quad (79)$$

Уравнением состояния (78) вводится понятие емкости для явлений качества. Здесь очень важно подчеркнуть, что емкость K ничего общего не имеет с известным понятием теплоемкости (или энергоемкости). Это прямо следует из выражения (79), где в знаменателе стоит не температура, как в теплоемкости, а качество. Поэтому, чтобы избежать путаницы, емкость K целесообразно именовать не энергоемкостью, а информоемкостью; обоснование этого термина приводится ниже.

Из выражения (79) видно, что информоемкость, или коэффициент информоемкости, численно равен энергии, которую необходимо затратить, чтобы качество (энергиял) продукта увеличилось на единицу. При этом продуктом, как уже отмечалось, могут служить кокиль, отливка, инструмент, литейная машина, специалист, технология, организация производства и т. д. Чем выше информоемкость продукта, тем сильнее надо потрудиться, чтобы повысить его качество, и наоборот, с уменьшением информоемкости качество продукта возрастает на единицу при малых затратах энергии. Для идеальной в термодинамическом смысле системы (при постоянном A) из дифференциального уравнения (78) получаем уравнение состояния в виде

$$\Pi = AU. \quad (80)$$

Если система (продукт) располагает двумя разнородными степенями свободы ($n = 2$), то уравнение состояния выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} d\Pi = A_{11} dU + A_{12} dE; \\ dP = A_{21} dU + A_{22} dE. \end{cases} \quad (81)$$

Здесь первая строчка относится к явлению качества, а вторая — к любому другому.

При наличии n разнообразных явлений, включая явление качества, их связь и взаимное влияние определяются более сложным уравнением состояния вида

$$dP_i = \sum_{r=1}^{r=n} A_{ir} dE_r, \quad (82)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; P_i — интенсификатор системы; E_r — ее экстенсор.

Выпишем отдельно первые строчки этих уравнений для энергияла.

Получаем

$$d\Pi = A_{11}dU + A_{12}dE_2 + \dots + A_{1n}dE_n \quad (83)$$

Как видим, на энергиял в общем случае оказывают влияние термические, механические, электрические и прочие явления. В частном случае из общих уравнений состояния (82) при $n = 1$ и $n = 2$ получаются уравнения (78)—(81).

Эффект взаимного влияния различных явлений подчиняется закону взаимности (симметрии), определяемому четвертым уравнением [24, с. 19], [25, с. 238]

$$A_{12} = A_{21} \text{ или } A_{ir} = A_{ri}. \quad (84)$$

Эти равенства перекрестных коэффициентов состояния (коэффициентов взаимности) свидетельствуют о том, что данное явление влияет на энергиял в количественном отношении точно так же, как энергиял влияет на данное явление.

Процесс переноса энергии в явлениях качества определяется пятым уравнением. Один из наиболее интересных для нас вариантов уравнения переноса имеет вид [24, с. 18], [25, с. 238]

$$I = \beta X, \quad (85)$$

где I — удельный поток энергии, переданной через поверхность системы за единицу времени, Вт (имеет смысл переданной мощности);

$$I = \frac{dU}{dt};$$

t — время, с; β — коэффициент переноса (проводимость), 1/Вт;

$$\beta = \frac{1}{X};$$

X — действующая на поверхности системы разность энергиялов;

$$X = \delta\Pi = \Pi - \Pi_c;$$

Π — энергиял системы;

Π_c — энергиял окружающей среды.

Проводимость β представляет собой коэффициент отдачи экстенсора, в данном случае энергии, на поверхности системы (продукта) [22, с. 46], [23, с. 151], [26, с. 71]. Она обратна сопротивлению (Вт):

$$R = \frac{1}{\beta} = \frac{X}{I}. \quad (86)$$

Это уравнение напоминает известное уравнение закона Ома для электрической цепи.

Таким образом, уравнением переноса (85) вводится понятие сопротивления для явлений качества. Однако здесь следует особо подчеркнуть, что сопротивление R ничего общего не имеет с известными понятиями термического и электрического сопротивления. Это хорошо видно из размерности величины R . Аналогично предыдущему, для избежания путаницы коэффициент β будем называть информопроводностью, а коэффициент R — информосопротивлением.

Из уравнения (85) следует, что информопроводность, или коэффициент информопроводности, численно равен энергии, которая проходит через поверхность системы внутрь или наружу за единицу времени при наличии единичной разности энергиялов между системой и окружающей средой. Чем выше коэффициент β , тем быстрее продукт повышает или понижает свое качество.

Уместно обратить внимание на некоторые тонкости механизма переноса в явлениях качества. Как уже говорилось, роль объекта переноса в этих явлениях играет энергия. Она передается под действием разности энергиялов $\delta\Pi$ (или $\Delta\Pi$), причем передача происходит в направлении от большего энергияла к меньшему. Сам же энергиял, или качество Π , подобно температуре, давлению, электрическому и химическому потенциалам, передаваться не может, качество Π способно лишь возрастать или уменьшаться в системе.

Отсюда следует, что годный продукт, например отливку, можно изготовить только в условиях, когда энергиял (квалификация) персонала и энергиял (совершенство) оборудования превышают потребный энергиял (потребное качество) продукта. Чем больше имеющаяся разность энергиялов между персоналом и оборудованием — с одной стороны и продуктом — с другой, тем быстрее будет изготовлен продукт и выше будет его качество. Если же потребный энергиял продукта больше, чем у персонала и оборудования, тогда годный продукт получить нельзя; процесс пойдет в обратном направлении — будут происходить научение персонала и доводка технологии, а сроки выполнения заказа неизбежно будут сорваны и отодвинуты на период научения.

Интенсивность производственного процесса в значительной степени зависит от информоемкостей и информопроводностей продукта, персонала и оборудования. С уменьшением информоемкости продукта и информосопротивлений персонала и оборудования производительность труда возрастает.

Существует также много других видов проводимостей и сопротивлений, которые с успехом могут быть использованы для наших целей [22, с. 39—53]. Например, весьма полезна внутренняя проводимость системы L . Эта проводимость вводится с помощью следующего уравнения переноса [22, с. 50], [23, с. 151], [26, с. 71]:

$$J = -L \frac{d\Pi}{dx}, \quad (87)$$

или в конечных разностях

$$J = -L \frac{\Delta \Pi}{\Delta x},$$

где J — удельный поток энергии (или удельная мощность), Вт/м²;

$$J = \frac{dU}{Fdt};$$

F — площадь сечения системы, м²; $\frac{d\Pi}{dx}$ и $\frac{\Delta \Pi}{\Delta x}$ — градиенты энергияла в этом сечении, 1/м.

Для n разнородных явлений, включая явление качества, справедливы уравнения переноса типа линейных уравнений Онзагера [26, с. 71]. Находим

$$I_i = \sum_{r=1}^{r=n} \beta_{ir} X_r, \quad (88)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; I_i — поток экстенсора; X_r — разность интенсификации.

Первая строчка этого уравнения для потока энергии имеет вид

$$I_U = \beta_{11} \delta \Pi + \beta_{12} X_2 + \dots + \beta_{1n} X_n.$$

Отсюда видно, что на поток энергии влияют разности всех n интенсификаций — энергиялов, температур, давлений и т. д. В частном случае при $n = 1$ из общего уравнения (88) получается более простое уравнение переноса (85).

Взаимное влияние (увлечение) потоков при переносе экстенсоров подчиняется закону увеличения (шестое уравнение) и описывается соответствующим уравнением онзагеровского типа [24, с. 21], [25, с. 239]. Получаем

$$\beta_{12} = \beta_{21}; \beta_{ir} = \beta_{ri}. \quad (89)$$

Равенство перекрестных коэффициентов переноса (коэффициентов увлечения) свидетельствует о симметричном характере взаимного влияния потоков различной физической природы. Первый поток увлекается вторым в количественном отношении точно так же, как второй поток увлекается первым.

Наконец, потери или приобретения качества при переносе энергии внутри системы определяются седьмым уравнением, которое выглядит следующим образом [24, с. 22], [25, с. 239]:

$$dQ_d = U d\Pi. \quad (90)$$

Аналогом этого уравнения служит уравнение известного закона Джоуля—Ленца для электрических явлений.

Условность принятого нами энергетического толкования явления качества выражается, в частности, в том, что диссипативная

работа dQ_d (Дж) не обязательно полностью превращается в теплоту.

Уравнение (90) является последним из числа исходных в термодинамике необратимых процессов. Более подробные сведения обо всех этих уравнениях можно почерпнуть из соответствующих специальных работ [22—24, 26].

Качество статической системы. При выполнении практических расчетов часто можно непосредственно воспользоваться указанными дифференциальными уравнениями. Однако иногда возникают задачи, специфика которых не позволяет прямо подставлять нужные параметры технологии в эти уравнения. В таких случаях исходные дифференциальные уравнения используют для вывода других, более сложных уравнений, которые лучше приспособлены для решения возникающих конкретных задач.

Проблема очень существенно упрощается, если весь класс явлений состояния и переноса подразделить на четыре характерные группы, различающиеся особенностями поведения экстенсора. Благодаря этому в исходные дифференциальные уравнения, а также получаемые на их основе расчетные формулы можно внести определенные характерные упрощения, которые резко облегчают решение многих практических задач.

В общем случае экстенсор способен находиться в состоянии покоя или перемещения, его величина в системе может оставаться неизменной или изменяться. В соответствии с этим, если экстенсор находится в состоянии покоя и не изменяется со временем, то система именуется равновесной стационарной (статической), соответствующие системы изучаются в статике. Если покой экстенсора сочетается с изменением величины последнего, то система является равновесной нестационарной (статодинамической) и рассматривается в статодинамике. Если система пронизывается экстенсором, но ее собственный экстенсор остается постоянным, то система называется неравновесной стационарной (кинетической) и обсуждается в кинетике. Наконец, пронизывание системы переменным по величине экстенсором делает ее неравновесной нестационарной (кинетодинамической, или динамической). Такие системы изучают в кинетодинамике, или динамике; они являются наиболее общими и сложными, из них в частном случае получаются все предыдущие [22—24, 26].

Статика имеет дело с равновесными стационарными системами, изолированными от воздействий окружающей среды. Свойства статических систем определяются уравнениями (82) и (84) и соответствуют самой простой группе явлений.

В статической системе отсутствуют потоки экстенсоров и диссипация, ибо внутри системы все разности интенсификаций $\Delta P = 0$.

Благодаря этому система выступает как единое целое, у нее не наблюдается разницы в свойствах отдельных участков.

Полная изоляция системы наступает, если все проводимости в уравнении (88), в том числе коэффициент информопроводности (инфомотдачи), обращаются в нуль, т. е. $\beta = 0$. При этом все интенсификации, включая качество Π , сохраняют неизменные значения в течение сколь угодно длительного времени.

Разумеется, статические условия являются идеальными. В действительности полностью оградиться от воздействия окружающей среды невозможно. Но иногда бывает очень важно максимально приблизиться к идеальным условиям. На практике подобные задачи возникают, например, при консервации (длительном хранении) системы, в частности кокиля. В таких случаях обычно ставится задача сохранить исходное качество Π_n кокиля как можно дольше.

Качество статодинамической системы. Если в сечении системы разности интенсификаций пренебрежимо малы, но величина экстенсоров изменяется со временем, то система оказывается статодинамической. Соответствующие условия возникают при малых значениях коэффициентов β по сравнению с L . Внутри такой системы разницы в свойствах отдельных участков тоже не наблюдается. Статодинамические, как и статические, системы изучаются в классической термодинамике.

Свойства, в том числе качество Π , статодинамической системы определяются уравнениями (69), (70), (82), (84), (88) и (89), уравнение (90) утрачивает свою силу из-за отсутствия переноса внутри системы. Одновременно утрачивают свое значение и проводимости L , процесс целиком определяется коэффициентами β и емкостями системы K . При этом легко находится зависимость качества Π от времени t . Для этого достаточно объединить и проинтегрировать уравнения (78) и (85).

На практике со статодинамическими системами приходится иметь дело при изготовлении, хранении и эксплуатации кокиля и отливки. Соответствующие задачи для различных конкретных условий литья рассматриваются ниже.

Кинетическая система. В кинетике изучаются неравновесные стационарные, или кинетические, системы. Кинетическая система пронизывается экстенсорами, но ее собственные экстенсоры и интенсификации остаются неизменными. При расчетах кинетической системы непосредственно используют все исходные дифференциальные уравнения — (69), (70), (82), (84), (88), (89) и (90).

В сечении кинетической системы интенсификации распределены неравномерно, это является причиной существования потоков экстенсоров, а также приводит к неодинаковости свойств на различных ее участках. Стационарность свидетельствует о независимости свойств от времени. В производственных процессах кинетические системы служат в основном промежуточными звеньями, работающими на стационарном режиме, через них передаются экстенсоры.

В явлениях качества соответствующие условия возникают, например, при работе специалиста с инструментом или на станке. В данном случае энергия передается от человека к производимому продукту через инструмент и станок, которые, следовательно, играют роль кинетической системы.

Кинетодинамическая система. Кинетодинамическая, или динамическая (неравновесная нестационарная), система является наиболее общей. В определенных частных случаях из нее могут быть получены все предыдущие — статическая, статодинамическая и кинетическая.

Приведенные выше исходные дифференциальные уравнения справедливы и для динамической системы. Однако непосредственно использовать их при расчетах нельзя, поскольку различные точки такой системы обладают неодинаковыми свойствами, изменяющимися со временем.

Поэтому, чтобы вывести общее дифференциальное уравнение распространения экстенсоров, описывающее свойства динамической системы, в ней мысленно выделяется элементарный объем $dV = dx dy dz$, к которому и прилагаются исходные уравнения, включая (87). В результате, например применительно к явлениям качества, в простейшем случае одномерного поля энергетического получается следующее искомого дифференциальное уравнение распространения энергии:

$$\rho \kappa \frac{\partial \Pi}{\partial t} = L \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2}, \quad (91)$$

где ρ — плотность системы; κ — ее удельная массовая информоемкость; $\kappa = \frac{K}{m}$; m — масса системы; L — упомянутый выше коэффициент информопроводности.

Найденные в кинетодинамике дифференциальные уравнения описывают весь класс явлений состояния и переноса. Однако к этим уравнениям целесообразно обращаться только в крайних случаях, когда задачу не удастся свести к более простой — статической, статодинамической, кинетической или их сочетанию.

При практических расчетах решение любой конкретной задачи сводится к интегрированию дифференциальных уравнений, приведенных в статике, статодинамике, кинетике и кинетодинамике, и согласованию полученных результатов с условиями однозначности. Условия однозначности содержат все сведения, которые необходимы для выделения из класса явлений интересующего нас данного конкретного (единичного) явления. Они включают в себя геометрические и физические свойства, а также временные (начальные) и граничные условия.

Дифференциальные уравнения в совокупности с условиями однозначности полностью определяют все свойства любого кон-

кретного единичного явления, т. е. любой конкретной системы, рассмотренной в статике, статодинамике, кинетике или кинетодинамике.

Взаимодействие систем. Однако на производстве чаще всего приходится сталкиваться не с одной, а с несколькими различными системами, находящимися во взаимодействии и составляющими технологическую цепь. Например, такие условия возникают при изготовлении кокиля, когда взаимодействуют между собой специалист (рабочий), инструмент или станок (оборудование) и кокиль (продукт), при формировании отливки в кокиле и т. д. Поэтому рассмотренный выше теоретический аппарат используется в дальнейшем главным образом для решения проблемы взаимодействия. При этом исключительно важную роль сыграют упрощения, достигнутые в статике, статодинамике и кинетике.

Если говорить о технологической цепи, составленной из статических систем, то ей отвечают самые простые расчетные формулы, ибо в такой цепи взаимодействие отсутствует и она фактически распадается на отдельные системы, никак между собой не связанные.

Если технологическая цепь состоит из взаимодействующих между собой статодинамических систем, то расчетные формулы заметно усложняются. На производстве такие условия встречаются довольно часто, например, к ним обычно сводится задача об охлаждении отливки в хорошо окрашенном кокиле, когда интенсивность теплообмена мала ($n = 1$). Еще более сложные формулы получаются при $n > 1$.

Взаимодействие статодинамических систем сопровождается изменением их интенсификации P , в том числе энергияла Π , если речь идет о явлениях качества. В последнем случае важное значение приобретают информемкости K систем, составляющих технологическую цепь. При этом цепь могут образовать системы, соединенные параллельно или последовательно. В зависимости от вида соединения полная (суммарная) информемкость цепи приобретает различные значения, которые могут быть найдены с помощью известных правил электротехники или теплотехники.

Внутри статодинамической системы могут происходить изменения, которые сопровождаются повышением или снижением ее качества. Это следует связывать с наличием внутреннего источника энергии мощностью ($Вт$)

$$\omega = \pm \frac{dU}{dt}, \quad (92)$$

причем положительный источник энергии повышает качество, а отрицательный (сток) — снижает. Даже в изолированной системе ($\beta = 0$) возможны рост качества, например при самообуче-

нии специалиста, и снижение качества, например при самопроизвольной деструкции, старении продукта.

Задачи с внутренними источниками энергии часто встречаются на производстве, поэтому представляют большой практический интерес. Конкретные примеры подобных задач рассмотрены ниже.

Если технологическая цепь составлена из кинетических систем, то к ней применимы все уравнения кинетики. При этом цепь может включать в себя несколько соединенных последовательно или параллельно систем. В таких случаях необходимо уметь найти полное (суммарное) информемсопротивление цепи. Это, как и в случае информемкости, делается по известным правилам электротехники или теплотехники.

Внутри кинетической системы могут существовать скачки энергияла $\mathcal{E}$, которые по аналогии с электродвижущей силой целесообразно называть информемдвижущей силой. В этих условиях технологическая цепь становится неоднородной. В случае явлений качества для расчета сложных неоднородных разветвленных цепей, по которым передается энергия, можно воспользоваться известным аппаратом, разработанным, в частности, в электротехнике. В ней неоднородность (наличие скачков энергияла $\mathcal{E}$) учитывается законом Ома, а разветвленность — законами Кирхгофа.

В кинетической системе тоже может находиться внутренний источник энергии. В частности, инструмент и станок обладают определенными значениями энергияла и в то же время могут быть снабжены особыми электрическими приводами. При расчетах это обстоятельство учитывается с помощью мощности внутреннего источника ω .

Наконец, если технологическая цепь состоит из взаимодействующих между собой динамических систем, то задача получается наиболее трудной.

4. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ КАЧЕСТВА КОКИЛЯ

Классификация взаимодействий в технологической цепи изготовления кокиля. Приведенные выше уравнения и формулы, содержащие универсальные критерии качества и эффективности, служат фундаментом для создания конкретных расчетных методов обобщенного проектирования кокиля с учетом взаимодействия последнего с другими системами, входящими вместе с кокилем в состав соответствующих технологических цепей. Очевидно, что при расчетах необходимо различать цепи, предназначенные для проектирования, изготовления, хранения и эксплуатации кокиля. В настоящем параграфе приводятся методы расчета каждой из перечисленных конкретных технологических цепей.

Из предыдущего должно быть ясно, что любую технологическую цепь можно составить, комбинируя рассмотренные выше ста-

тические, статодинамические, кинетические и динамические системы. Однако общее число различных возможных систем получается слишком большим, что затрудняет рациональный выбор необходимой расчетной схемы.

Подробный анализ показывает, что в реальных условиях линейного производства нет надобности обращаться к сложным динамическим системам. В большинстве случаев практики удается обойтись самыми простыми системами, причем эти последние обычно фигурируют в технологических цепях в весьма ограниченных сочетаниях. В связи с этим для упрощения и конкретизации задачи целесообразно дать общую классификацию наиболее употребительных систем и их взаимодействий, с помощью которой можно было бы построить рациональную расчетную цепь и решить, таким образом, практически любой технологический вопрос.

Согласно термодинамике необратимых процессов, всякое взаимодействие любой пары систем всегда связано с переносом экстенсора, точнее энергии, поскольку сейчас речь идет о явлениях качества. Поэтому для построения достаточно полной и универсальной классификации взаимодействий надо прежде всего выделить наиболее характерные виды систем, различающихся особенностями распространения в них энергии. При этом, очевидно, статические системы нас пока интересовать не должны, так как им чужды эффекты переноса и, следовательно, они в принципе не способны участвовать во взаимодействиях.

Анализ показывает, что всего должно быть три различных наиболее характерных вида взаимодействующих систем. Система первого вида располагает собственными внутренними источниками энергии или скачками энергияла (информодвижущими силами) — в этом состоит ее основное назначение. Система второго вида таких источников и скачков не имеет, она способна только либо повышать, либо понижать свой энергиял. Наконец, системы третьего вида служат главным образом мостиком — передатчиком, или проводником, энергии между взаимодействующими системами. Для них характерен стационарный режим работы, без изменений собственного энергияла.

Однако для полноты классификации требуется учесть еще одну существенную тонкость, диктуемую законом переноса и практическими соображениями. Согласно этому закону, всякий поток экстенсора, в том числе энергии, когда имеются в виду явления качества, есть вектор, обладающий величиной и направлением. Для практических целей это обстоятельство имеет исключительно важное значение, ибо направление потока энергии, его знак, предопределяет характер, назначение, целевую установку взаимодействия.

В свете изложенного каждый из упомянутых видов систем должен быть расчленен на два подвида, различающихся направлением потока энергии, его знаком. В результате получаются шесть подвидов систем, с которыми можно сопоставлять шесть основных типов взаимодействий. Рассмотрим их более подробно.

Очевидно, что соединение в технологическую цепь пары систем первого подвида может дать два различных типа взаимодействий. Первый из них соответствует случаю, когда скачки энергияла, или информодвижущие силы, $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ в системах имеют одинаковые знаки. В этом случае общая информодвижущая сила цепи находится как сумма отдельных скачков энергияла, т. е.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2. \quad (93)$$

Полный поток энергии определяется суммарной информодвижущей силой цепи $\mathcal{E}$. В этих условиях системы действуют в одном и том же направлении, помогают друг другу, выступают как единое целое.

Второй тип взаимодействий получается, если информодвижущие силы систем $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ имеют разные знаки. Результирующая информодвижущая сила цепи, состоящей из подобных систем, получается как разность отдельных информодвижущих сил, т. е.

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2. \quad (94)$$

Полный поток энергии отвечает этой разности. Действия таких систем направлены в диаметрально противоположные стороны, системы подавляют одна другую. Поскольку энергиял представляет собой универсальную количественную меру способа, качества, совершенства поведения системы, постольку разность $\mathcal{E}$ в формуле (94) является универсальной количественной мерой превосходства одной системы над другой, мерой подавления одной системы со стороны другой.

Интересно отметить, что в кибернетике принято различать взаимодействия типа сотрудничества, или коалиции, и типа конфликта. Как видим, эти термины очень четко и ясно выражают суть того, что происходит. Уравнения (93) и (94) фактически дают количественное определение указанных понятий кибернетики.

Оба рассмотренных типа взаимодействий — сотрудничества и конфликта — встречаются в любом производственном процессе. В частности, первый из них наблюдается при взаимодействии рабочего и инструмента или станка, а второй — при взаимодействии кокиля и отливки, резца и заготовки, штампа и изделия, молота и сваи и т. д.

Третий и четвертый типы взаимодействий получаются, если технологическую цепь составляют, например, две системы второго вида, различающиеся значениями своих энергиялов. В этих условиях энергия переходит от системы с большим энергиялом к системе с меньшим. В результате энергиялы обеих систем изменяются до тех пор, пока не сравняются между собой.

Если энергиял интересующей нас системы возрастает — при этом соблюдается неравенство $d\Pi > 0$, то в системе происходит накопление качества (энергии и энергияла). Такой процесс можно

назвать взаимодействием типа накопления (третий тип взаимодействий).

В противоположном случае, когда качество интересующей нас системы снижается, т. е. $d\P < 0$, система расходует, тратит энергию, соответствующий процесс именуется взаимодействием типа затрат (четвертый тип взаимодействий).

Третий и четвертый типы взаимодействий тоже всегда встречаются в технологических процессах. Например, при изготовлении кокиля его энергия повышается (третий тип). Хранение и эксплуатация кокиля всегда сопровождаются снижением его качества (четвертый тип).

Связующие системы третьего вида участвуют во взаимодействиях пятого и шестого типов, такие системы могут быть активными и пассивными, без них не обходится ни один технологический процесс. Пассивный связующий мостик обладает определенным информосопротивлением R , которое всегда вызывает потери качества внутри мостика на величину $\Delta\P$. Активный мостик содержит источник энергии (или скачок энергияла), этот источник (или скачок) может быть направлен либо в сторону основного потока энергии, тогда $\Delta\P > 0$, либо в противоположную сторону, тогда $\Delta\P < 0$.

Повышение качества ($\Delta\P > 0$) возможно только в активном мостике, снижение ($\Delta\P < 0$) — в активном и пассивном. Первый случай соответствует взаимодействию типа проводимости (пятый тип), второй — типа сопротивления (шестой тип). Именно эти разности энергиялов $\Delta\P$ на концах связующего мостика (звена технологической цепи) подставляются в критерий эффективности (77).

С помощью рассмотренных наиболее характерных видов простейших систем в принципе можно составить любую сложную технологическую цепь, так как в совокупности они охватывают все возможные условия взаимодействий. В подобной цепи системы первого вида являются активными, они содержат в себе движущую причину переноса энергии, служат генераторами качества и антикачества. Системы второго вида пассивны. Системы третьего вида могут быть как активными, так и пассивными, они либо помогают, либо оказывают сопротивление при выполнении технологических операций. Составляя и изучая технологические цепи, следует не упускать из виду, что отдельные сложные системы способны сочетать в себе несколько или даже все упомянутые признаки взаимодействий одновременно. К числу последних систем можно отнести, например, человека.

Воспользуемся изложенной здесь классификацией взаимодействий и приведенными выше основными расчетными формулами и обсудим конкретные заводские примеры определения качества кокиля при его проектировании, изготовлении и хранении, а также

при эксплуатации. В последнем случае рассматриваются два варианта, во втором из них речь пойдет о методе расчета стойкости с учетом того, что в процессе производства достигнутое качество кокиля имеет определенный разброс значений; это вынуждает прибегнуть к теории случайных явлений.

Приведенные примеры наиболее характерны, они демонстрируют возможности предлагаемого метода и одновременно могут служить схемами, которые подскажут пути решения других возникающих на практике задач. Соответствующие заводские примеры определения качества отливки и эффективности различных технологий литья обсуждаются в параграфе 6.

Расчет качества на стадии проектирования кокиля. Рассмотрим вопрос о проектировании чугунного кокиля (СЧ 18-36) на конкретном примере изготовления из сплава АЛ9 корпуса отсчетного устройства на Минском механическом заводе им. С. И. Вавилова (ММЗ) [33, с. 18]. Подробные сведения об этом и изготавливаемой кокиле в нем отливке приведены в параграфе 5.

Процесс производства любого продукта (кокиля, отливки и т. д.) всегда можно мысленно расчленить на две основные весьма характерные стадии: проектирование и изготовление. Первая стадия обычно связана с воплощением в проекте какой-то идеи, с умственной (вербальной) деятельностью, вторая — с реализацией проекта, с операциями изготовления продукта, с моторной деятельностью. Такое расчленение производственного процесса имеет чрезвычайно важное значение, это станет ясно из параграфа 6.

Следовательно, операция проектирования требует от инженера-конструктора определенного вербального научения. Чтобы правильно спроектировать кокиль, инженер должен располагать соответствующими знаниями, иметь необходимую квалификацию (качество), которая оценивается величиной энергияла Π_n .

Весь процесс проектирования можно отобразить с помощью технологической цепи, состоящей из трех последовательно соединенных систем: инженера-конструктора (специалист, работник), его инструмента — карандаша, бумаги, справочника, логарифмической линейки, ЭВМ и т. д. (оборудование) и проекта кокиля (продукт). Первая система является активной, служит генератором качества, она взаимодействует со второй по типу сотрудничества — уравнение (93), причем скачок энергияла $\mathcal{E}_1 = \Pi_n$. Если скачком энергияла $\mathcal{E}_2$ можно пренебречь, тогда вторая система превращается в пассивный связующий мостик. Третья система взаимодействует с двумя предыдущими по типу накопления качества.

Первую и вторую системы допустимо рассматривать как кинетические (неравновесные стационарные), а третью — как статодинамическую (равновесную нестационарную). В этих условиях информемостями и информосопротивлениями первой и второй

систем, а также информосопротивлением третьей системы можно пренебречь.

Для простоты примем, что в ходе проектирования данного кокиля квалификация инженера остается практически неизменной ($\Pi_n = \text{const}$). Производительность инженера, определяемую коэффициентом информоотдачи β , а равно информоемкость проекта K будем считать величинами постоянными.

Как видим, расчет обсуждаемой технологической цепи сводится к решению задачи о накоплении качества проектом кокиля при постоянных значениях энергияла окружающей среды $\Pi_c = \Pi_n$, коэффициентов β и K и при известных начальном Π_n и конечном (потребном) Π_k значениях качества проекта. В результате расчета должны быть найдены время t достижения проектом кокиля заданного качества Π_k , затраченные на проектирование энергия U и информоэнергия W .

Для решения поставленной задачи нельзя непосредственно воспользоваться уравнениями основных законов, но можно с их помощью вывести специальное дифференциальное уравнение, описывающее данный конкретный случай. С этой целью применим уравнения (78) и (85), записанные в форме

$$dU = K d\Pi;$$

$$dU = \beta \delta \Pi dt = \beta (\Pi_c - \Pi) dt.$$

Первое из этих равенств показывает, на сколько изменяется (повышается) энергияла системы (проекта) при подводе к ней энергии dU , второе выражает приобретенную энергию через разность энергиялов и время. Объединив указанные два равенства и проинтегрировав полученное таким образом дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, находим [22, с. 88], [23, с. 375], [26, с. 193]

$$\frac{\Pi_c - \Pi}{\Pi_c - \Pi_n} = e^{-\frac{\beta}{K} t}. \quad (95)$$

Здесь постоянная интегрирования исключена с помощью следующего начального условия: при $t = 0$ энергияла $\Pi = \Pi_n$.

Затраченная на проектирование энергия (Дж) определяется уравнением

$$U = K (\Pi_c - \Pi_n) \left(1 - e^{-\frac{\beta}{K} t}\right),$$

или

$$U = K (\Pi - \Pi_n),$$

причем величина удельного потока энергии [24, с. 38]

$$I = I_n e^{-\frac{\beta}{K} t},$$

где I_n — начальный удельный поток энергии, Вт.

Затраченная информоэнергия находится с помощью равенств (70) или (72) и (79), которые приводят к дифференциальному уравнению

$$dW = \Pi dU = K \Pi d\Pi.$$

При постоянном K интегрирование этого уравнения дает

$$W = \frac{1}{2} K \Pi^2 = \frac{1}{2} \Pi U = \frac{1}{2} A U^2. \quad (96)$$

В общем виде поставленная задача решена. Выводы сделаны в предположении о постоянстве коэффициентов β и K , однако расчетными формулами можно пользоваться и при переменных β и K , например, когда сложность проекта не одинакова во всех своих частях, в условиях форсирования планового задания и т. д. В таких случаях надо либо соответствующим образом осреднять указанные коэффициенты, что дает вполне удовлетворительные результаты, либо весь процесс разбивать на отдельные участки, в пределах которых эти коэффициенты допустимо считать величинами постоянными.

Найденные соотношения позволяют сделать интересные количественные выводы. Например, из формул видно, что для повышения качества проектирования и производительности труда надо стремиться повышать квалификацию инженера Π_n и увеличивать коэффициент информоотдачи β . На величину β оказывают влияние не только индивидуальные особенности инженера, но и внешние условия труда. При выдаче задания следует помнить, что с течением времени t скорость роста качества проекта быстро замедляется и при $\Pi_k \rightarrow \Pi_c = \Pi_n$ длительность проектирования неограниченно возрастает. Поэтому целесообразно, чтобы квалификация инженера Π_n значительно превышала потребное качество проекта Π_k . Но при слишком больших Π_n заметно снижается эффективность использования квалификации. Особое внимание надо обратить на органическую связь, существующую между качеством продукта и длительностью проектирования — формула (95).

Вернемся к нашему заводскому примеру проектирования кокиля для корпуса отсчетного устройства. Проект этого кокиля разрабатывает инженер-конструктор второй категории, его квалификация $\Pi_n = \Pi_c = 120\,000$, начальное качество проекта $\Pi_n = 0$, потребное — $\Pi_k = 70\,000$. Коэффициент информоотдачи

инженера $\beta = 4,16 \cdot 10^{-4}$ 1/Вт, информемкость проекта $K = 341$ Дж. Величина Π_n выбрана по данным параграфа 6, коэффициенты β и K определены с помощью исходных уравнений (см. параграф 3) по существующим на заводе нормам. При определении энергии мы исходили из того, что отдаваемая во внешнюю среду полезная мощность человека в среднем составляет $I_n = 50$ Вт.

В рассматриваемых условиях время достижения проектом заданного качества [формула (95)] составляет $t = 720\,000$ с $= 200$ ч. Затраченные на проектирование энергия $U = 23,7 \times 10^6$ Дж и информэнергия $W = 83 \cdot 10^{10}$ Дж.

Любопытно сравнить данный кокиль с рассмотренной ниже (см. параграф 5) пресс-формой для крышки, пресс-форма из стали 4ХМФС проектируется инженером-конструктором первой категории. При этом параметры процесса имеют следующие значения: $\Pi_n = \Pi_c = 280\,000$, $\Pi_k = 0$, $\Pi_k = 105\,000$, $\beta = 1,78 \times 10^{-4}$ 1/Вт, $K = 151$ Дж, $t = 396\,000$ с $= 110$ ч, $U = 15,8 \times 10^6$ Дж, $W = 83 \cdot 10^{10}$ Дж.

Из приведенных данных видно, что на проектирование кокиля и пресс-формы затрачены одинаковые информэнергии, но качество (совершенство) проекта во втором случае значительно выше, чем в первом. Совершенство достигается не за счет энергии, которая уменьшается, а за счет квалификации, умения. Если инженеру второй категории поручить проектирование пресс-формы, то он затратит в несколько раз больше времени — формула (95), которое потребуется ему для соответствующего научения. Однако эффективность использования квалификации $\eta = \frac{\Pi_k}{\Pi_n}$ в первом случае (0,583) существенно выше, чем во втором (0,375).

Обсуждаемые конкретные примеры весьма показательны. Благодаря предельной универсальности критериев качества и эффективности полученные значения величин могут быть с успехом использованы для сравнения как сходственных, так и совсем не похожих друг на друга технологических процессов на различных заводах.

Расчет качества на стадии изготовления кокиля. Обратимся к прежнему примеру кокиля для корпуса. Производство начинается с составления технологии изготовления оснастки. Эту операцию выполняет инженер-технолог третьей категории ($\Pi_n = 45\,000$), длительность операции $t = 8$ ч $= 28\,800$ с.

Составление технологии можно рассчитывать тем же методом, что и проектирование, но из-за малого удельного веса в общем балансе эту операцию допустимо также грубо оценивать с помощью следующих приближенных формул:

$$U = I_n t, \quad (97)$$

откуда

$$U = 50 \cdot 28\,800 = 1,44 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

и

$$W = \frac{1}{2} \Pi_n U;$$

откуда

$$W = \frac{1}{2} 45\,000 \cdot 1,44 \cdot 10^6 = 3,24 \cdot 10^{10} \text{ Дж.}$$

Точно такие же значения параметров имеет операция составления технологии для пресс-формы.

При изготовлении кокиля рассматривают технологическую цепь, состоящую из трех последовательно соединенных систем — рабочего («р»), инструмента или станка (оборудование «о») и кокиля (продукт «п»). Как и прежде, первые две системы можно считать кинетическими (неравновесными стационарными) со скачками энергияла $\mathcal{E}_p$ и $\mathcal{E}_o$ и источниками энергии ω_p и ω_o , а третью — статодинамической (равновесной нестационарной). Но при этом возникает исключительно интересный и важный для практики вопрос о характере взаимодействия указанных систем, от которого зависит движущая сила переноса энергии Π_c , определяющая интенсивность накопления продуктом качества.

Действительно, при правильном изготовлении кокиля, т. е. при строгом выполнении технологических условий, качество продукта должно быть равно проектному ($\Pi_k = 70\,000$). Следовательно, в общем случае движущую силу процесса накопления надо выражать уравнением

$$\Pi_c = \Pi_k + \mathcal{E}_p + \mathcal{E}_o. \quad (98)$$

Это уравнение весьма примечательно. Оно связывает качество продукта Π_k с квалификацией рабочего $\mathcal{E}_p$ и совершенством оборудования $\mathcal{E}_o$, причем формула (95) требует, чтобы величина Π_c была всегда больше Π_k . Следовательно, возможность достижения продуктом проектного качества целиком определяется знаком скачков энергияла $\mathcal{E}_p$ и $\mathcal{E}_o$, т. е. упомянутым характером взаимодействия между отдельными системами технологической цепи. В зависимости от особенностей этого взаимодействия на практике реализуются те или иные варианты производственного процесса.

В наиболее благоприятном (идеальном) случае рабочий и оборудование взаимодействуют по типу сотрудничества [формула (93)], а рабочий и оборудование общаются с продуктом по типу накопления. В этих условиях знаки всех энергиялов положительны, а качество продукта — наивысшее. При этом качество иногда даже может превышать проектное.

Однако нередко и такие случаи, когда квалификация рабочего недостаточна, либо оборудование неисправно или непригодно. В подобных ситуациях взаимодействие рабочего, оборудования и продукта оказывается конфликтным. При этом один из скачков энергияла ($\mathcal{E}_p$ или $\mathcal{E}_o$), либо оба сразу ($\mathcal{E}_p$ и $\mathcal{E}_o$) становятся отрицательными, а качество продукта получается ниже проектного.

Предельным развитием такой ситуации является случай, когда

$$\Pi_k = -(\mathcal{E}_p + \mathcal{E}_o). \quad (99)$$

Рабочий и оборудование взаимодействуют с продуктом по типу конфликта, причем движущая сила процесса накопления качества равна нулю ($\Pi_c = 0$). Получается неисправимый брак нулевого качества, энергия и материалы расходуются впустую.

Таким образом, в идеальном случае все энергиялы положительны, рабочий и оборудование способствуют повышению проектного качества продукта. В противоположном крайнем случае рабочий и оборудование снижают это качество за нуль. Преимущество предлагаемого метода расчета заключается в том, что он позволяет определять качество во всем диапазоне его изменений — от меньше нуля и до значения, превышающего проектное.

После всех этих необходимых замечаний рассмотрим процесс изготовления конкретного кокиля. Теперь мы это можем сделать уже двумя различными способами — по уравнению (95) и пооперационно с помощью приближенных формул, приведенных на с. 126 применительно к операции технологической проработки проекта. Вторым способом расчета удастся воспользоваться только в том случае, если технологический процесс четко разбит на отдельные конкретные операции, либо если весь процесс допустимо рассматривать как одну самостоятельную операцию. Кстати, каждую отдельную операцию тоже можно рассчитывать по уравнению (95). Примером первого способа служит расчет стадии проектирования, примером второго — расчет технологической проработки проекта, рассматриваемой в виде самостоятельной операции. Другой пример пооперационного расчета приводится в параграфе 5 для отливки, причем в этом случае одна из операций — формирование отливки в кокиле — оценивается по формуле (95). В настоящем параграфе стадию изготовления кокиля мы рассчитаем укрупненно первым способом с помощью уравнения (95).

По заводским данным, если полное время изготовления кокиля $t = 600 \text{ ч} = 2\,160\,000 \text{ с}$ принять за 100%, то длительность заготовительных операций составит 6,5%, их выполняет рабочий третьего разряда. Для кузнечных операций соответственно имеем: 1% и 3-й разряд, для механических — 57% и 4-й разряд, слесарных — 34% и 4-й разряд, термических — 1,5% и 3-й разряд (пресс-форма отличается от кокиля только тем, что слесарные опе-

рации выполняет рабочий 5-го разряда). Средний разряд рабочего равен 3,81, что соответствует $\Pi_p = 3$ (для пресс-формы — 4,15 и $\Pi_p = 14$).

Фактические затраты энергии на перечисленные выше операции соответственно равны $563 \cdot 10^6$; $322 \cdot 10^6$; $3,08 \cdot 10^3$; $15 \cdot 10^6$ и $415 \cdot 10^6$ Дж (для пресс-формы имеем: $718 \cdot 10^6$; $413 \cdot 10^6$; $3,94 \cdot 10^3$; $19 \cdot 10^6$ и $530 \cdot 10^6$ Дж). Суммарные затраты энергии $U_n = 1,32 \times 10^9$ Дж (для пресс-формы $U_n = 1,68 \cdot 10^9$ Дж). Эти затраты найдены по мощности рабочего ω_p и оборудования ω_o и времени их действия t с помощью следующей приближенной формулы:

$$U_n = U_p + U_o = (\omega_p + \omega_o)t \text{ Дж}. \quad (100)$$

Средний энергиял оборудования, на котором изготавливается кокиль, $\Pi_o = 12$ (для пресс-формы $\Pi_o = 15$). Следовательно, при благоприятных (идеальных) условиях изготовления кокиля (все энергиялы положительны, организация производства удовлетворительна, необходимые материалы, инструменты и оборудование имеются и т. д.) движущая сила процесса накопления качества [уравнение (98)]

$$\Pi_c = 70\,000 + 3 + 12 = 70\,015$$

(для пресс-формы $\Pi_c = 105\,029$).

Зная энергиялы и мощности источников энергии, нетрудно определить информосопротивления рабочего и оборудования — формула (86). Имеем

$$R_p = \frac{\Pi_p}{\omega_p}; \quad R_o = \frac{\Pi_o}{\omega_o}.$$

Этими сопротивлениями в первом приближении можно пренебречь. Кроме того, стационарность начального участка технологической цепи (рабочего и оборудования) делает несущественными информоемкости рабочего K_p и оборудования K_o , а равновесность конечного участка (кокиля) — несущественным информосопротивлением продукта R_n . Известными являются коэффициент информоотдачи $\beta = 1,34 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Вт}$ и информоемкость $K = 3,15 \cdot 10^4 \text{ Дж}$ (для пресс-формы $\beta = 0,887 \cdot 10^{-2} \text{ 1/Вт}$, $K = 2,67 \times 10^4 \text{ Дж}$).

Перечисленных сведений вполне достаточно, чтобы воспользоваться уравнением (95) и определить качество готового кокиля Π_n , а также его информэнергию W_n . Находим: $\Pi_n = 42\,000$ и $W_n = 2,78 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$ (для пресс-формы $t = 765 \text{ ч} = 2,76 \cdot 10^6 \text{ с}$, $\Pi_n = 63\,000$, $W_n = 5,29 \cdot 10^{13} \text{ Дж}$).

Обращает на себя внимание тот факт, что при изготовлении кокиля все характеристики технологического процесса — время, затраченная энергия и информэнергия, коэффициенты информоотдачи и информоемкости — во много раз выше, чем при про-

ектировании. В противоположность этому энергиялы у рабочего и оборудования много меньше, чем у проекта. Отсюда должно быть ясно, что фундамент качества продукта закладывается при проектировании.

Из расчетов также видно, что качество изготовленного кокиля (и пресс-формы) оказалось заметно ниже, чем запроектированного (данные параграфа 5 говорят о том, что благодаря имеющемуся запасу такое качество устраивает литейщика). Это есть прямое следствие существования «железной» зависимости качества (Π_n) от «количества», т. е. от производительности труда, которая характеризуется временем изготовления продукта (t) и определяется всеми параметрами технологического процесса — качеством проекта (Π_k), квалификацией рабочего (Π_p), совершенством оборудования (Π_o), условиями труда (β), информемкостью (энергоемкостью) продукта (K) и т. д.

Обсуждаемый метод расчета качества впервые дает возможность установить однозначную количественную связь между всеми перечисленными категориями.

Изменение качества при хранении кокиля. Следующая актуальная задача заключается в том, чтобы определить потерю качества кокилем при хранении последнего в течение времени t . Эта задача сводится к рассмотрению технологической цепи, состоящей всего из одной статодинамической (равновесной нестационарной) системы и окружающей среды, взаимодействующих между собой по типу затрат качества. Поставленную задачу целесообразно обсудить на прежнем заводском примере кокиля для корпуса.

Начальное качество изготовленного кокиля ($\Pi_n = 42\,000$) и его информемкость ($K = 3,15 \cdot 10^4$ Дж) нам известны. Энергиялы окружающей среды Π_c обычно можно считать постоянным и равным нулю. Величина коэффициента информемкости β определяется условиями хранения и имеет некоторое осредненное по времени постоянное значение. Требуется найти зависимость качества Π кокиля от времени t .

Решение этой задачи в принципе похоже на все предыдущие и приводит к уравнению, аналогичному (95). Имеем

$$\frac{\Pi - \Pi_c}{\Pi_n - \Pi_c} = e^{-\frac{\beta}{K} t}. \quad (101)$$

Из этого уравнения видно, что с течением времени скорость потери качества быстро снижается и в пределе энергиялы продукта Π становится равным энергиялу Π_c окружающей среды через бесконечное время. С уменьшением коэффициента β потеря качества тоже замедляется. В пределе при $\beta \rightarrow 0$ статодинамическая система превращается в статическую. В противоположном

крайнем случае, когда $\beta \rightarrow \infty$, продукт мгновенно теряет свои потребительские свойства.

Вспользуемся формулой (101) для расчета нашего заводского кокиля. При его хранении в цехе коэффициент информемкости $\beta = 3,7 \cdot 10^{-5}$ 1/Вт, что соответствует снижению качества до $\Pi_{\min} = 20\,000$ — это минимальное допустимое значение энергиялы данного годного кокиля — в течение 20 лет (1 год = $3,16 \cdot 10^7$ с, 1 сутки = 86 400 с). Вблизи минимального качества некондиционный кокиль легко может быть восстановлен путем незначительного ремонта — удаления ржавчины и т. д., однако качество восстановленного таким образом кокиля обычно бывает ниже начального Π_n .

Для пресс-формы в аналогичных условиях хранения при $\Pi_{\min} = 30\,000$ коэффициент информемкости $\beta = 3,13 \cdot 10^{-5}$ 1/Вт.

Применение консервирующих смазок снижает коэффициент β в несколько раз и соответственно увеличивает срок успешного хранения кокиля (и пресс-формы).

Учет старения материала. Если внутри материала происходят какие-либо изменения, связанные, например, с процессом старения — деформационного, в пересыщенном твердом растворе и т. п., — и эти изменения влияют на качество кокиля, то их можно легко учесть, как уже отмечалось, с помощью внутреннего источника энергии ω . В остальном задача напоминает предыдущую: рассматривается взаимодействие статодинамической системы с источником и окружающей средой.

При определении искомой зависимости качества продукта Π от времени t будем считать, что мощность источника ω и коэффициенты β и K суть величины постоянные, энергиялы окружающей среды Π_c также от времени не зависят. В рассматриваемых условиях необходимая расчетная формула получается из следующего дифференциального уравнения баланса энергии:

$$dU = \omega dt = K d\Pi + \beta (\Pi - \Pi_c) dt.$$

После разделения переменных и интегрирования этого уравнения находим

$$\frac{\omega - \beta (\Pi - \Pi_c)}{\omega - \beta (\Pi_n - \Pi_c)} = e^{-\frac{\beta}{K} t}, \quad (102)$$

где Π_n — начальное качество продукта.

Это равенство похоже на формулу (101), но в нем дополнительно фигурирует внутренний источник энергии.

В условиях идеальной изоляции от окружающей среды ($\beta = 0$) изменение качества продукта целиком определяется внутренним источником и подчиняется следующему линейному закону:

$$\Pi = \Pi_n + \frac{\omega}{K} t.$$

Этими формулами можно пользоваться как при затратах, так и при накоплении качества, причем внутренний источник и окружающая среда могут влиять на качество в одном и том же, либо в прямо противоположных направлениях. Это учитывается с помощью знака соответствующих слагаемых.

Изменение качества при эксплуатации (расчет стойкости кокиля. Очень ответственным является процесс эксплуатации, в котором реализуется достигнутое при проектировании и изготовлении качество кокиля. Этот процесс допустимо рассматривать как взаимодействие двух статодинамических систем, причем в первом приближении их взаимоотношениями с окружающей средой можно пренебречь.

О двух различных методах решения подобных задач уже говорилось на с. 118. Здесь мы воспользуемся третьим приближенным приемом, сочетающим в себе два предыдущих. Суть этого приема заключается в следующем.

Детально рассматриваем обмен энергией между кокилем и отливкой, как в первом методе. При этом окружающей средой для кокиля служит отливка, а для отливки — кокиль. Рассчитывая кокиль, будем считать постоянным качество отливки, а рассчитывая отливку — качество кокиля. В результате кокиль и отливку допустимо изучать независимо друг от друга, как во втором методе, при использовании среднекалориметрического значения интенсификации. Такой прием давно и успешно применяют при расчетах процессов охлаждения тонкостенной отливки в массивном кокиле или массивной отливки в тонкостенном кокиле (см. с. 17).

Как видим, поставленная задача сводится к определению потерь качества кокилем в результате его взаимодействия с окружающей средой, роль которой играет отливка; аналогично отливка приобретает качество в результате взаимодействия с кокилем. Благодаря этому для расчетов можно непосредственно использовать формулу (101), выведенную применительно к стадии хранения продукта. Только в этой формуле время t целесообразно выразить через число заливок N с помощью соотношения

$$t = \frac{N}{n} c,$$

где n — скорость (интенсивность) эксплуатации кокиля, равная числу заливок в единицу времени;

$$n = \frac{dN}{dt} \text{ 1/с.}$$

Окончательно расчетная формула приобретает вид

$$\frac{\Pi - \Pi_c}{\Pi_n - \Pi_c} = e^{-\frac{\beta}{K} \frac{N}{n}}$$

или

$$N = 2,3n \frac{K}{\beta} \lg \frac{\Pi_n - \Pi_c}{\Pi - \Pi_c}. \quad (103)$$

Кокиль выходит из строя тогда, когда его качество достигает минимально допустимого значения $\Pi = \Pi_{\min}$. В нашем конкретном примере минимальное качество кокиля $\Pi_{\min} = 20\,000$, энергия окружающей среды $\Pi_c = 0$, интенсивность эксплуатации $n = 1,35 \cdot 10^{-5}$ 1/с, коэффициент информотдачи $\beta = 3,15 \cdot 10^{-5}$ 1/Вт, величины Π_n и K известны из расчета стадии изготовления. Расчет по выведенной формуле показывает, что в рассматриваемых условиях число заливок N до выхода кокиля из строя примерно равно 10 000. Кокиль обычно выходит из строя по причине износа рабочей поверхности, возникновения зазора в разъеме или поломки выступающих частей.

Для пресс-формы имеем: $\Pi_{\min} = 30\,000$, $n = 6,33 \cdot 10^{-6}$ 1/с, $\beta = 6,27 \cdot 10^{-6}$ 1/Вт, $N = 20\,000$. Пресс-форма обычно выходит из строя из-за появления разгарных трещин.

Статистический подход при расчете стойкости кокиля. Большой теоретический и практический интерес представляет возможность решения задачи о стойкости кокиля с учетом того, что на параметры кокиля влияют случайные факторы. В реальных условиях литья такая ситуация возникает из-за отклонения энергиялов при изготовлении кокиля и отливки от некоторых средних расчетных значений. Эти случайные отклонения оказывают решающее влияние на результат конфликтного взаимодействия в экстремальных условиях, когда номинальные величины энергиялов систем сближаются. Следствием этого является большой разброс значений стойкости N различных экземпляров одного и того же кокиля.

О наблюдаемом в производственных условиях разбросе стойкости можно судить на примере водоохлаждаемого кокиля из стали 15Л, предназначенного для литья стоек плугов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, рассмотренного в гл. VIII. Опыт эксплуатации таких кокилей показывает, что наименьшую стойкость имеют плоские участки (изображены справа на рис. 72). При этом после образования первой сквозной трещины и появления течи кокиль подвергают ремонту, трещины заваривают. Поэтому для данного кокиля наиболее характерными являются два показателя — стойкость (число заливок) до возникновения первой сквозной трещины (N_1) и полная стойкость (N_2), когда качество кокиля снижается до минимального допустимого предела и не может быть восстановлено ремонтом.

В заводских условиях эксплуатировались два типа кокилей — с толщиной стенки $X_2 = 35$ мм и 50 мм. Первые кокили оказались

менее долговечными; вот конкретные значения стойкости их отдельных экземпляров:

№ кокиля	1	2	3	4	5
N_1	2616	1935	3 006	3742	2721
N_2	9747	8930	15 547	3797	8328

Отсюда средние стойкости соответственно равны: $N_{1cp} = 2804$ и $N_{2cp} = 9270$.

Для кокилей с толщиной стенки 50 мм имеем:

№ кокиля	1	2	3	4	5	6
N_1	2 676	7686	3 706	3 088	7659	4566
N_2	12 350	8902	11 207	11 772	8706	9697

№ кокиля	7	8	9	10	11	12
N_1	11 397	8761	7324	1660	6668	11 994
N_2	11 397	8964	7324	6664	7919	11 994

Средние стойкости: $N_{1cp} = 6432$ и $N_{2cp} = 9733$.

Заметим, что разброс значений наблюдается у всех параметров взаимодействующих систем технологической цепи, например это относится к размерам, механическим свойствам материалов, температурам и т. д. Однако расчет стойкости кокиля (резца, штампа, молота и т. д.), а также надежности функционирования литейного оборудования (в общем случае — любой сложной системы, участвующей во взаимодействии) основывается на использовании только энергала и его вариаций. Это объясняется тем, что энергил представляет собой главный, предельно универсальный параметр, одновременно объединяющий и определяющий все важнейшие свойства (поведение) любой системы.

Разброс значений энергала подчиняется законам случайных явлений. Поэтому решение поставленной задачи невозможно без привлечения статистических методов. Чтобы вычислить вероятность отказа (выхода из строя) кокиля (или другой системы), надо располагать средними значениями энергала кокиля (и отливки) и соответствующими функциями распределения.

Если энергил кокиля велик по сравнению с энергалам отливки, то вероятность отказа очень мала и ею можно пренебречь — такие условия имеют место при первых заливках. По мере уменьшения энергала в процессе эксплуатации кокиля вероятность отказа возрастает. Эта вероятность определяется с помощью известных функций распределения.

Наконец, наступает критический период, соответствующий экстремальным условиям взаимодействия, когда средние значения энергала кокиля $\Pi_{ко}$ и отливки $\Pi_{от}$ сближаются и доверительные интервалы $\Pi_{ко} \pm \delta_{ко}$ и $\Pi_{от} \pm \delta_{от}$ начинают накладываться друг на друга. При этом возможен выход из строя как кокиля, так и отливки — все зависит от конкретных значений доверительных интервалов. Вероятность отказа одной из систем или надеж-

ность ее функционирования находится по функциям распределения известными методами теории вероятностей и математической статистики.

Например, статистическая обработка результатов эксплуатации упомянутого кокиля приводит к следующим значениям доверительных интервалов для стойкости:

$$\begin{aligned} \text{при } X_2 = 35 \text{ мм} \\ N_1 = 2804 \pm 334, \quad N_2 = 9270 \pm 2140 \\ \text{и при } X_2 = 50 \text{ мм} \\ N_1 = 6432 \pm 963, \quad N_2 = 9733 \pm 598. \end{aligned}$$

Эти величины покрывают (охватывают) реальную стойкость с доверительной вероятностью (надежностью), равной 0,682.

Приведенный новый метод расчета и заводские примеры определения качества при проектировании, изготовлении, хранении и эксплуатации кокиля очень характерны и позволяют сделать много полезных для практики количественных выводов. Эти выводы должны способствовать целесообразной организации производства, направленной на повышение качества и эффективности.

5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ КАЧЕСТВА ОТЛИВКИ

Расчет размерного качества отливки. Приведем несколько конкретных примеров из заводской практики применения универсальных критериев для оценки качества отливки, эффективности производства и сравнения различных технологий литья. Начнем с обсуждения самого простого примера расчета качества отливки (он не требует выполнения каких-либо особых вычислений). Речь идет о нахождении неких специфических характеристик качества, которые достигаются с помощью определенного вида работ и операций, целиком регламентированных существующими нормами. Эти нормы связывают интересующие нас свойства изделия с квалификацией персонала. Но энергил персонала известен (см. параграф 6), поэтому любое упомянутое свойство может быть непосредственно сопоставлено с соответствующим значением качества. Нормы — это обобщенный производственный опыт, следовательно, полученные таким образом результаты должны отличаться большой степенью достоверности. Подобного рода примеры очень полезны для освоения предлагаемой методики оценки качества изделий и эффективности производства.

Самым простым и наглядным примером определения энергала служит размерная механическая обработка изделий. При этом класс точности обработки определяется ГОСТом, потребная квалификация рабочего — тарифным справочником [55], а качество — таблицами параграфа 6. Необходимые для расчетов данные приведены на рис. 44, где светлые кружочки на кривой 1 относятся к различным видам механической обработки. По заданному раз-

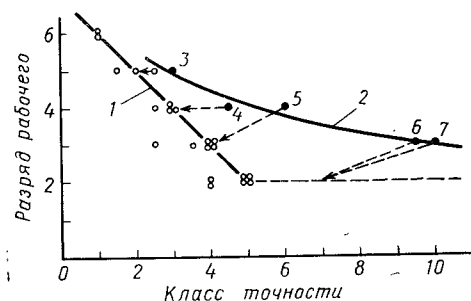


Рис. 44. Связь между размерной точностью изделия и квалификацией рабочего при механической обработке (кривая 1) и литье (кривая 2)

мерному качеству (классу точности) находим требуемый разряд рабочего, а по разряду — энергиял с помощью таблиц параграфа 6.

На рис. 44 приведена также аналогичная кривая 2 (черные точки)

для оценки размерного качества отливок при различных способах литья: 3 — под давлением, 4 — по выплавляемым моделям, 5 — в кокиль, 6 — в песчаную форму, 7 — в почву (из совместной работы с аспирантом М. К. Шариповой).

Как видим, при одинаковом размерном качестве изделий разряд литейщика должен быть несколько выше, нежели разряд станочника, это обстоятельство весьма характерно, о нем более подробно говорится ниже. Штриховые стрелки показывают, на сколько классов литейную форму следует делать точнее, чтобы получилась отливка данного класса точности.

Таких примеров определения качества продукта непосредственно по данным справочников можно привести множество. Значительно труднее определить энергиял для случаев, когда продукт получается в результате осуществления сложного технологического процесса, включающего в себя большое число различных операций, в том числе проектирование, изготовление, доводку и т. д.

Расчет совершенства литейного оборудования. Рассмотрим теперь более сложные примеры определения качества отливки. При расчетах отливки мы вполне можем воспользоваться формулами и приемами, которые были разработаны и применены ранее для расчета кокиля. Ведь методы расчета качества кокиля содержат все основные черты, которые неизбежно присутствуют при проектировании, изготовлении, хранении и эксплуатации любого продукта, включая кокильную отливку.

Как известно, технологическая цепь изготовления отливки содержит, помимо кокиля, также много другого специфического литейного оборудования. Поэтому, прежде чем приступить к непосредственной оценке качества отливки, необходимо найти основные характеристики — энергиялы, энергии и информэнергии — наиболее употребительного литейного оборудования. Порядок расчета оборудования может быть следующим.

Вначале составляют подробный список всех операций производства данного оборудования, начиная от проектирования и кончая изготовлением. Для каждой отдельной операции указывают ее

длительность, квалификацию (энергиял) персонала, совершенство (энергиял) инструмента или оборудования, затраченную энергию. По этим данным с помощью выведенных выше формул вычисляют полные затраченные энергию и информэнергию, а также искомый средний энергиял (качество) данного литейного оборудования.

Примером расчетов служит табл. 7, где приведены средние энергиялы простейшего литейного оборудования, полученные с учетом преобладающей роли энергиялов персонала. Здесь же даны затраченные энергия и информэнергия.

Расчет качества кокильной отливки. Найденные энергиялы литейного оборудования (табл. 7) использованы для расчета качества упомянутой выше (см. параграф 4) конкретной отливки — корпуса отсчетного устройства, изготавливаемой на ММЗ [33].

Материал отливки — сплав АЛ9, габаритные размеры $151 \times 146 \times 90$ мм. Чистая масса изделия равна 0,89 кг, черновая масса кокильной отливки — 1,48 кг. Чугунный кокиль (СЧ 18—36) состоит из плиты и двух матриц, разъем вертикальный, один стержень песчаный, другой — металлический.

Таблица 7

Энергиялы, энергии и информэнергии литейного оборудования

Оборудование	Энергиял Π	Энергия U , кДж	Информэнергия W , кДж
Бегуны	$2,78 \cdot 10^{-4}$	12 400	345
Ковш	$2 \cdot 10^{-4}$	75	0,015
Шлифовальный станок	1,81	5 100	9 250
Ленточная пила	1,61	45 900	74 000
Камерное сушило	$3,78 \cdot 10^{-2}$	23 800	900
Электропечь	$3,74 \cdot 10^{-2}$	45 200	1 690

В табл. 8 представлены исходные и расчетные данные для различных операций изготовления указанной отливки. Для рабочих («р») приведены значения нормативного времени t , потребные разряды, соответствующие им энергиялы Π_r , заимствованные из параграфа 6 и затраченные рабочими энергии U_r ; для оборудования («о») — энергиялы Π_o и затраченные оборудованием энергии U_o ; для продукта-отливки («п») — рассчитанные энергиялы Π_p , затраченные энергии U_p и информэнергии W_p . Все эти данные соответствуют отдельным укрупненным операциям технологического процесса. Среднее значение энергияла Π кокильной отливки в целом указано в заголовке таблицы.

При расчете процесса формирования отливки (операция 6) использован найденный ранее энергиял кокиля (31 000), равный среднему арифметическому между начальным максимальным (42 000) и конечным минимальным (20 000) его значениями. Вклад

Исходные и расчетные данные при литье корпуса в кокиль, $\Pi = 3340$

Операция	Рабочие				Оборудование		Отливка		
	t, c	Раз- ряд	Π_p	$U_p',$ кДж	Π_o	$U_o',$ кДж	Π_n	$U_n',$ кДж	$W_n',$ кДж
1. Сушка песка . . .	24	3	$9,79 \cdot 10^{-2}$	1,2	$2,78 \cdot 10^{-2}$	94	$12,6 \cdot 10^{-2}$	95	6
2. Изготовление стерж- ня	150	4	6,77	7,5	16 800	—	16 800	7,5	63 000
3. Сушка стержня . .	20	4	6,77	1,0	$3,78 \cdot 10^{-2}$	500	6,81	501	1 700
4. Плавка	84	5	150	4,2	$3,74 \cdot 10^{-2}$	5 040	150	5 044	378 000
5. Заливка в ковш . .	60	5	150	3,0	$2 \cdot 10^{-4}$	—	150	3	225
6. Заливка в кокиль	216	5	150	10,8	31 000	2 250	31 200	2 261	$35,3 \cdot 10^6$
7. Обрубка	156	4	6,77	7,8	$2,1 \cdot 10^{-4}$	—	6,77	8	27,1
8. Обрезка	108	—	6,77	5,4	1,61	216	8,8	221	925
9. Зачистка	240	3	$9,79 \cdot 10^{-2}$	12,0	1,81	1 080	1,91	1 092	1 050
10. Термообработка . .	120	4	6,77	6,0	$3,74 \cdot 10^{-2}$	1 440	6,81	1 446	4 930
Сумма . . .	1160	—	—	57,9	—	10 600	—	10 700	$35,7 \cdot 10^6$

отдельных операций технологического процесса подсчитан по приближенным формулам, приведенным на с. 126.

Расчет качества отливки при литье в песчаную форму и под давлением. Исключительно интересно сопоставить среднее качество кокильной отливки с качеством отливки, изготовленной другими способами, например при литье в песчаную форму и пресс-форму. Для возможности такого сравнения в табл. 9 сведены аналогичные данные для корпуса отсчетного устройства, отлитого в песчаную форму. Черновая масса этого корпуса при литье в землю равна 1,7 кг.

Проектирование песчаной формы сводится в основном к проектированию модели. В данном случае над проектом работал инженер второй категории с квалификацией $\Pi = 114\,000$, качество проекта $\Pi = 57\,000$. Энергиал изготовленной деревянной модели $\Pi = 28\,500$, минимально допустимое при эксплуатации качество модели $\Pi_{\min} = 5000$, среднее расчетное качество $\Pi = 16\,800$.

В табл. 9 изготовлению песчаной формы посвящены первые пять операций технологического процесса. Готовая форма характеризуется следующими значениями величин: $\Pi = 175$, $U = 1100$ кДж, $W = 193\,000$ кДж. Найденное значение энергиала использовано при расчете процесса формирования отливки (операция 8), среднее качество последней приведено в заголовке таблицы.

Была подробно исследована также вторая упомянутая выше (см. с. 126) отливка — крышка. На Минском механическом заводе им. Вавилова (ММЗ) крышка переведена с литья в песчаные формы на литье под давлением, поэтому мы располагаем всеми необходимыми для расчетов производственными данными по этим двум видам литья [33].

Материал крышки — сплав АЛ2, габаритные размеры $109 \times 168 \times 121$ мм. Чистая масса изделия 0,36 кг, черновая масса при литье в песчаную форму составляет 0,55 кг, а при литье под давлением — 0,38 кг. Материал пресс-формы — сталь 4ХМФС.

При литье в песчаную форму операция проектирования модели для крышки, по заводским данным, практически совпадает с аналогичной операцией для корпуса и поэтому характеризуется теми же значениями энергиалов. Что касается изготовления песчаной формы, то ему соответствуют первые три операции технологического процесса в табл. 10. Свойства песчаной формы определяются следующими величинами: $\Pi = 2320$, $U = 250$ кДж, $W = 580\,000$ кДж. Формирование отливки (операция 5) рассчитано с помощью этого значения энергиала, среднее качество отливки $\Pi = 240$.

При расчете технологического процесса литья крышки под давлением (табл. 11) использовано среднее качество пресс-формы (46 500) между его начальным (63 000) и

Таблица 9

Исходные и расчетные данные при литье корпуса в песчаную форму, $\Pi = 65$

Операции	Рабочие			Оборудование		Отливка			
	t, с	Раз- ряд	П _р	U _р , кДж	П _о	U _о , кДж	П _п	U _п , кДж	W _п , кДж
1. Приготовление формочной смеси . .	150	3	9,79·10 ⁻²	7,5	2,78·10 ⁻²	470	12,6·10 ⁻²	478	30,1
2. Сушка песка . . .	24	3	9,79·10 ⁻²	1,2	2,78·10 ⁻²	94	12,6·10 ⁻²	95	6,0
3. Изготовление стержня	150	4	6,77	7,5	16 800	—	16 800	7,5	63 000
4. Сушка стержня . .	20	4	6,77	1,0	3,78·10 ⁻²	500	6,81	501	1 700
5. Формовка	300	5	150	15	16 800	—	17 000	15	128 000
6. Плавка	84	5	150	4,2	3,74·10 ⁻²	5040	150	5040	378 000
7. Накладывание грунта на верхнюю полуформу	60	4	6,77	3,0	—	—	6,77	3	10,2
8. Заливка-выбивка	150	4	6,77	7,5	175	—	182	8	728
9. Обрубка	180	4	6,77	9,0	2,1·10 ⁻⁴	—	6,77	9	30,5
10. Обрезка	108	4	6,77	5,4	1,61	216	8,38	221	930
11. Зачистка	240	3	9,79·10 ⁻²	12,0	1,81	1080	1,91	1092	1 050
12. Термообработка . .	120	4	6,77	6,0	3,74·10 ⁻²	1440	6,81	1446	4 930
Сумма . . .	1570	—	—	78,3	—	8840	—	8918	579 000

Таблица 10

Исходные и расчетные данные при литье крышки в песчаную форму, $\Pi = 240$

Операции	Рабочие				Оборудование		Отливка		
	t, с	Раз- ряд	П _р	U _р , кДж	П _о	U _о , кДж	П _п	U _п , кДж	W _п , кДж
1. Приготовление формочной смеси . .	42	3	9,79·10 ⁻²	2,1	2,78·10 ⁻²	132	12,6·10 ⁻²	134	8,45
2. Сушка песка . . .	12	3	9,79·10 ⁻²	0,6	2,78·10 ⁻²	47	12,6·10 ⁻²	48	3,02
3. Формовка	1370	5	150	68,5	16 800	—	17 000	69	585 000
4. Плавка	24	5	150	1,2	3,74·10 ⁻²	1440	150	1440	108 000
5. Заливка-выбивка	48	4	6,77	2,4	2320	—	2 330	2,4	2 800
6. Накладывание грунта на верхнюю полуформу	60	4	6,77	3,0	—	—	6,77	3	10,2
7. Обрубка	90	4	6,77	4,5	2,1·10 ⁻⁴	—	6,77	5	16,9
8. Обрезка	36	4	6,77	1,8	1,61	72	8,38	74	310
9. Зачистка	168	4	6,77	8,4	1,81	756	8,58	766	3 290
10. Термообработка . .	24	4	6,77	1,2	3,74·10 ⁻²	290	6,81	291	990
11. Слесарная обработка	1800	3	9,79·10 ⁻²	90	4,9·10 ⁻²	—	0,2	90	9
Сумма . . .	3714	—	—	184	—	2737	—	2920	700 000

Таблица 11
Исходные и расчетные данные при литье крышки под давлением, $\Pi = 15\ 000$

Операции	Рабочие				Оборудование				Отливка			
	t, с	Раз- ряд	Π_p	$U_{р.кДж}$	Π_o	$U_{о.кДж}$	$\Pi_{п}$	$U_{п.кДж}$	$W_{п.кДж}$			
1. Плавка	24	5	150	1,2	$3,74 \cdot 10^{-2}$	1440	150	1441	108 000			
2. Заливка	204	4	6,77	10,2	46 500	3740	46 500	3480	81 · 10 ⁶			
3. Обрезка	90	4	6,77	4,5	1,61	180	8,38	185	775			
4. Обломка	60	3	$9,79 \cdot 10^{-2}$	3,0	$2,1 \cdot 10^{-4}$	—	$9,81 \cdot 10^{-2}$	3	0,147			
5. Термообработка	24	4	6,77	1,2	$3,74 \cdot 10^{-2}$	290	6,81	291	990			
Сумма . . .	402	—	—	20,1	—	5380	—	5400	81,1 · 10 ⁶			

конечным (30 000) значениями — операция 2. Эти энергиды найдены в предыдущем параграфе.

Приведенные четыре таблицы для отливок (8—11) рассчитаны однотипным способом. Полученные результаты позволяют сделать много интересных для практики выводов, наглядно иллюстрирующих преимущества универсального метода оценки качества и эффективности.

Сравнение качества различных отливок. Изготовление одного и того же корпуса в кокиле и в песчаной форме дает возможность непосредственно сравнить все особенности указанных технологических процессов (см. табл. 8 и 9). Прежде всего замечаем, что качество Π кокильной отливки в 50 раз лучше, чем полученной в песчаной форме. Это существенно сокращает последующую механическую обработку, которая повышает энергид корпус до требуемой величины.

Универсальность энергидала позволяет также оценить качество кокильного литья по сравнению с литьем под давлением, хотя в этом случае речь идет о двух совершенно различных отливках, из которых вторая отличается повышенной трудоемкостью (табл. 9 и 10). Сопоставление табл. 8 и 11 показывает, что технология литья под давлением обеспечивает в 4,5 раза более высокое качество отливки, чем кокильная технология.

Здесь уместно подчеркнуть следующее чрезвычайно важное обстоятельство: в кокиле качество отливки получается лучше, чем в песчаной форме, а в пресс-форме — еще лучше, чем в кокиле. Преимущество рассматриваемого метода оценки качества заключается в том, что различные технологии сравниваются не на словесном уровне (лучше—хуже), а на строго объективной количественной (числовой) основе. Возможность такого сравнения является естественным следствием предельной общности исходных теоретических предпосылок метода.

Сравнение эффективности различных технологий литья. Эффективность производства определяется с помощью универсальных критериев (74)—(77). Данные, приведенные в табл. 8—11, позволяют найти эффективность конкретного технологического процесса литья в кокиль, а также сравнить этот процесс с другими видами литья.

Например, применительно к кокильной технологии (см. табл. 8) эффективность использования квалификации инженера-конструктора определяется отношением качества проекта к энергиду инженера. Имеем

$$\eta_{\text{кок}\Pi} = \frac{70\ 000}{120\ 000} = 0,58.$$

Аналогично можно найти эффективность использования квалификации персонала при изготовлении и эксплуатации кокиля.

Эффективность использования машинной энергии определяется критерием

$$\eta_{\text{кок}U} = \frac{U_o}{U_{\Pi}} = \frac{10\ 600}{10\ 700} = 0,99.$$

По этой величине можно судить о доле ручного труда.

Подобным же образом составляются критерии эффективности использования информэнергии, времени, металла и т. д. Например, эффективность использования металла при литье в кокиль

$$\eta_{\text{кок}m} = \frac{0,89}{1,48} = 0,6.$$

Соответствующей оценке поддается каждая отдельная операция любого технологического процесса. Это позволяет сравнивать всевозможные операции как внутри данной технологии, так и между различными непохожими технологиями.

Любопытные результаты получаются при сравнении литья в кокиль с литьем в песчаную и в пресс-форму. Например, сопоставление энергидов персонала, форм и отливок для всех трех видов литья свидетельствует о том, что самым совершенным является литье под давлением. Это превосходство литья под давлением выражается следующими значениями критериев.

Сравнение квалификации инженеров-проектировщиков приводит к показателям:

$$\eta_{\text{кок П}} = \frac{120\,000}{280\,000} = 0,43 \text{ и } \eta_{\text{пес П}} = \frac{114\,000}{280\,000} = 0,41.$$

Как видим, по инженерам кокильная технология ($\eta_{\text{кок П}}$) почти не отличается от песчаной ($\eta_{\text{пес П}}$), но они обе более, чем в 2 раза, уступают литью под давлением.

Не менее впечатляющие числа получаются при сравнении среднего качества форм и отливок. Для форм имеем

$$\eta_{\text{кок П}} = \frac{31\,000}{46\,500} = 0,67 \text{ и } \eta_{\text{пес П}} = \frac{16\,800}{46\,500} = 0,36;$$

для отливок

$$\eta_{\text{кок П}} = \frac{3\,340}{15\,000} = 0,22, \quad \eta'_{\text{пес П}} = \frac{65}{15\,000} = 0,0043 \text{ и}$$

$$\eta''_{\text{пес П}} = \frac{240}{15\,000} = 0,016.$$

Суммарные критерии, определяющие эффективность использования квалификации инженера в сравнении с качеством получающейся отливки, для литья в пресс-форму, кокиль и песчаную форму соответственно равны:

$$\eta_{\text{пр П}} = \frac{15\,000}{280\,000} = 0,054, \quad \eta_{\text{кок П}} = \frac{3\,340}{120\,000} = 0,028,$$

$$\eta'_{\text{пес П}} = \frac{65}{114\,000} = 0,00057 \text{ и } \eta''_{\text{пес П}} = \frac{240}{114\,000} = 0,0021.$$

Эти числа говорят о том, что в конечном итоге при литье в кокиль квалификация инженера используется в 2 раза хуже, чем при литье в пресс-форму. В свою очередь, кокильная технология на порядок совершеннее, чем песчаная. При литье в песчаную форму для увеличения качества отливки требуется иметь повышенную квалификацию персонала. Этот вид литья несет в себе больше черт от искусства, чем от современного индустриального массового производства. И вообще, как уже отмечалось, по некоторым характеристикам качества процессы литья более сложны и менее совершенны, чем, например, механическая обработка.

Другие показатели эффективности—затраты времени (производительность труда), металла и т. д. — также говорят в пользу кокильного литья и в особенности в пользу литья под давлением. Например, перевод корпуса с литья в песчаную форму на литье в кокиль увеличивает производительность труда в

$$\eta_{\text{кок т}} = \frac{1570}{1160} = 1,35 \text{ раза,}$$

а перевод крышки на литье под давлением в

$$\eta_{\text{пр т}} = \frac{3\,714}{402} = 9,2 \text{ раза.}$$

Эффективность использования металла при литье корпуса в песчаную форму составляет

$$\eta_{\text{пес т}} = \frac{0,89}{1,7} = 0,52$$

(для кокиля $\eta_{\text{кок т}} = 0,6$). При литье крышки в песчаную форму и пресс-форму соответственно имеем

$$\eta_{\text{пес т}} = \frac{0,36}{0,55} = 0,65 \text{ и } \eta_{\text{пр т}} = \frac{0,36}{0,38} = 0,95.$$

Что касается затрат энергии, то с повышением качества отливки эти затраты возрастают (см. табл. 8—11). Еще более существенно увеличиваются затраты информэнергии, ибо последняя пропорциональна не только энергии, но и качеству.

Планирование качества отливки и эффективности литейного производства. Обращает на себя внимание тот замечательный факт, что все основные расчетные формулы, с помощью которых определяются качество и эффективность, содержат в себе время или могут быть выражены через него. Это относится не только к явлениям переноса, но и к явлениям состояния, поскольку, поделив все слагаемые уравнений (69), (70), (82), (90) и т. д. на время t или продифференцировав указанные уравнения по времени, мы тем самым от энергии U , информэнергии W , качества Π и эффективности η переходим к мощности $I = dW/dt$, информомощности $I_w = dW/dt$ и скоростям (темпам) изменения качества $\psi = d\Pi/dt$ и эффективности $\varphi = d\eta/dt$. В результате появляется возможность рассчитывать изложенными выше методами прирост со временем всех перечисленных величин, а именно:

$$dU = I dt, \quad dW = I_w dt, \quad d\Pi = \psi dt, \quad d\eta = \varphi dt.$$

Благодаря такой постановке вопроса открываются широкие перспективы для четкого планирования качества отливки и эффективности литейного производства с учетом реальных возможностей последнего — качества имеющегося сырья, совершенства наличного оборудования, квалификации персонала, сложившейся организации производства и т. д. При этом планирование осуществимо на любом уровне сложности системы — для отдельного специалиста, станка, предприятия, отрасли, страны и т. д.

Например, в каждый данный момент суммарный продукт литейного производства лимитируется величиной информэнергии

$$W = \frac{1}{2} \Pi_{\text{ср}} U,$$

а среднее качество продукта — величиной энергияла $\Pi_{\text{ср}}$. Невозможно произвести продукта больше, чем имеется информомощностей

$$I_w = \frac{W}{t}.$$

Среднее качество продукта не может быть выше, чем энергияла $\Pi_{\text{ср}}$, определяемый средней квалификацией литейщиков и средним совершенством оборудования. Средняя эффективность производства не может превышать величину $\eta_{\text{ср}}$. Все сказанное справедливо также для отрасли, предприятия, станка, специалиста и т.д.

При долгосрочном планировании учитывают (планируют) повышение со временем t показателей U , W , $\Pi_{\text{ср}}$ и $\eta_{\text{ср}}$ на величины ΔU , ΔW , $\Delta \Pi$ и $\Delta \eta$ соответственно. Здесь прирост ΔU , а следовательно и ΔW , определяется соображениями, зависящими не только от литейного производства. Что же касается показателей $\Delta \Pi$ и $\Delta \eta$, то они значительно сильнее связаны со структурой самого этого производства.

Для повышения качества и эффективности на величины $\Delta \Pi$ и $\Delta \eta$ за время Δt должны быть предусмотрены соответствующие подготовка специалистов и выпуск нужного количества более совершенного литейного оборудования, в частности механизированных и автоматизированных участков и линий, систем автоматизированного проектирования и управления и т.п. Так плановое повышение качества и эффективности оказывается жестко увязанным с постановкой образования и мероприятиями по повышению квалификации специалистов, с выпуском нового и заменой и ремонтом старого оборудования. Инструментом, позволяющим связать все эти категории, служат универсальные критерии качества и эффективности, а необходимый физический механизм связи обеспечивается приведенной выше теорией и вытекающими из нее расчетными методами и формулами.

Выпуск нового литейного оборудования и его замена планируются с учетом зависимости от времени t среднего энергияла Π в данной отрасли, стране или мире. На рис. 45, а эта зависимость для прошедшего времени изображена сплошной кривой, а для будущего — штриховой, причем штриховая линия является закономерным продолжением сплошной — она получена путем экстраполяции последней. Порядок расчета при планировании следующий.

Если в 1980 г. изготовлено совершенное оборудование, начальный энергиял Π_n которого заметно возвышается (на величину $+\Delta \Pi$) над средним уровнем, определяемым кривой, то пересечение горизонтали $\Pi = \Pi_n$ с продолжением упомянутой кривой определит дату $t = t_0$ морального старения (морального износа) данного оборудования. Заметное снижение со временем качества

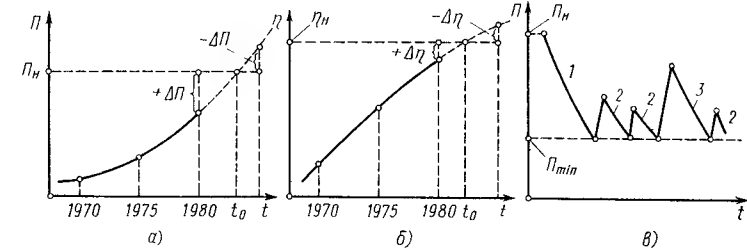


Рис. 45. Схемы к расчету качества (а), эффективности (б) и ремонта оборудования (в)

эксплуатируемого оборудования (на величину — $\Delta \Pi$) по сравнению со средним уровнем, характеризуемым кривой, говорит о необходимости заменить оборудование на более совершенное.

Аналогичным образом планируется начальная эффективность η_n создаваемой новой литейной технологии. При расчетах строится зависимость средней эффективности η от времени t для отрасли, страны или мира (рис. 45, б). В 1980 г. целесообразно осуществлять только такие процессы, эффективность которых располагается над кривой, при этом $\Delta \eta$ положительно. В точке $t = t_0$ пересечения кривой с горизонталью $\eta = \eta_n$ процесс себя морально изживает. Далее он только снижает общую эффективность народного хозяйства, так как величина $\Delta \eta$ становится отрицательной.

Ремонт литейного оборудования — сроки и объем ремонта — тоже планируются с помощью энергияла, начальное значение которого равно Π_n . Условия эксплуатации учитываются в расчетах посредством коэффициента информотдачи β . Необходимость ремонта определяется с помощью формулы (101) по моменту достижения энергиялом оборудования некоторого минимального значения Π_{min} , при котором качество продукта и эффективность работы становятся минимально допустимыми. На рис. 45, в период начальной эксплуатации оборудования обозначен цифрой 1, после профилактических ремонтов — 2, после капитального ремонта — 3.

Становится очевидным, что существующий во многих отраслях порядок планирования производства в тоннах (или условных тоннах) готовой продукции уже давно себя изжил. Его можно заменить, например, новым методом, который одновременно учитывал бы также качество Π , эффективность η и информэнергию W изделий.

6. РАСЧЕТ КВАЛИФИКАЦИИ ЛИТЕЙЩИКА

Качество и обобщенная информация. Мы подошли к самому важному и тонкому вопросу теории — определению энергияла специалиста. На первый взгляд может даже показаться, что по своей трудности эта новая проблема превосходит все предыдущие и

практически является неразрешимой. Однако внимательный анализ убеждает нас в прямо противоположном: проблема квалификации вполне разрешима, более того, только в ней можно найти ключ к решению всего комплекса вопросов, связанных с качеством и эффективностью.

С целью определения квалификации литейщика необходимо более пристально изучить те конкретные свойства энергияла, которые до сих пор оставались в тени. Ранее мы убедились, что в общем случае энергиял характеризует уровень эволюционного развития, специфические особенности поведения непростой реальной системы. Теперь в этом поведении следует усмотреть такие специфические частные черты, которые бы поддавались количественному определению. Это позволит лучше разобраться в физическом смысле энергияла и откроет путь к решению поставленной проблемы в целом.

Очевидно, что в частном случае системой, или продуктом, могут служить теория, проект, художественное полотно, музыкальное произведение и т. п. Каждая из перечисленных систем несет в себе определенное количество информации, понимаемой в традиционном смысле, например как некое сообщение. Эта информация может передаваться в процессе взаимодействия (общения) системы с окружающим миром, т. е. в процессе определенного поведения системы. Способ, качество, структура, совершенство, уровень развития поведения выражают заключенную в системе информацию и, в свою очередь, характеризуются энергиялом. Следовательно, в рассматриваемом частном случае энергиял является мерой того, что в современной теории информации принято понимать под информацией [27, с. 94], [28, с. 9], [30, с. 45].

Изложенное показывает, что энергиял есть значительно более широкое понятие, чем традиционное количество информации: помимо чисто информационного способа поведения системы он одновременно охватывает также и все без исключения остальные возможные способы этого поведения. Однако слово «информация» привлекает своими емкостью и многозначностью, которые хорошо отражаются в интуитивных представлениях об информации. Поэтому для обозначения энергияла целесообразно воспользоваться и этим словом, дополнительно назвав энергиял количеством обобщенной информации, или просто количеством информации. Нами оба этих термина — энергиял и количество информации — применяются на равных основаниях, но при этом нельзя забывать, что наше понятие информации является обобщенным, оно значительно шире того, которое применяется в современной теории информации.

В соответствии с изложенным, явление, описываемое уравнением (70), можно трактовать как некое информационное — в новом обобщенном понимании. В этом обобщенном информационном явлении роль фактора интенсивности (интенсияла) играет коли-

чество информации, или энергиял Π , который поэтому можно называть также информациялом. Роль фактора экстенсивности (экстенсора) принадлежит энергии, которая, следовательно, является энергияром, или информацияром.

Теперь становится хорошо понятной принятая ранее терминология, относящаяся к таким величинам, как информэнергия W , информомощность I_w , информоемкость K , информоотдача β , информопроводность L , информосопротивление R , информодвижущая сила $\mathcal{E}$ и т. д. Эта терминология позволяет избежать путаницы при сопоставлении новых понятий с известными, одновременно она имеет глубокий физический смысл.

Такая информационная трактовка явления (70) оказывается исключительно плодотворной не только при обсуждении проблемы качества и эффективности, но и при решении различных проблем собственно теории информации. Преимущество, которое дает использование понятия информации для определения качества и эффективности, заключается в том, что с информацией связаны интуитивные представления, непосредственно и очень точно выражающие существо рассматриваемой нами проблемы, в то время как формальный термин «энергиял» не способствует внесению ясности в эту проблему.

Например, с новой информационной точки зрения становится совершенно очевидным, что продукт не обязан нести в себе всю затраченную энергию. Он должен сохранить лишь те качественные, структурные, информационные признаки, которые были заложены в него в процессе производства. Именно только ради этих признаков, характеризующих энергиялом Π , и осуществляется технологический процесс.

Обобщенный информационный подход оказывается весьма полезным также и для традиционной теории информации, поскольку позволяет выяснить многие новые важные особенности информации и установить термодинамические законы, которым обязано подчиняться это понятие.

Принципы построения шкалы качества. При расчетах качества кокиля и отливки и эффективности литейной технологии необходимо уметь определять — вычислять, измерять и т. д. — величину энергияла (информацияла). С этой целью вначале придется построить соответствующую шкалу. Аналогичные шкалы для других интенсиялов — температуры, давления, электрического потенциала и т. д. — хорошо известны. Например, абсолютная температурная шкала носит название шкалы Кельвина.

Применительно к энергиялу легче всего установить абсолютный нуль отсчета. Поскольку энергиял характеризует уровень эволюционного развития поведения системы (материи), постольку нулевой уровень должен соответствовать абсолютному вакууму, обладающему самыми низкими (нулевыми) возможностями поведения.

Далее необходимо найти какие-то характерные (реперные) точки на шкале энергияла, аналогичные точкам плавления льда и кипения воды на шкале температуры. В качестве реперной точки можно выбрать, например, некий фиксированный уровень эволюционного развития различных систем, единый для всей Земли. В частности, этот уровень можно приурочить к дате 1 января 1901 года или к любой другой условно выбранной дате.

Значительно сложнее установить единицу измерения энергияла. Но и здесь при более детальном рассмотрении проблемы удается найти сравнительно простой выход из положения. Ведь энергиял, как мы только что установили, представляет собой количество информации. Следовательно, при выборе единицы измерения энергияла в качестве эталона можно было бы использовать какую-либо конкретную ЭВМ или другое устройство, способное вырабатывать определенное количество информации.

Однако на практике инженер в своей производственной деятельности вынужден давать оценку главным образом продуктам человеческого труда, способности и квалификации персонала. Поэтому за эталон целесообразнее всего принять именно самого человека, достигшего определенного возраста. За единицу измерения энергияла можно взять, например, то количество обобщенной информации, которую способен выработать или воспринять человек в этом возрасте в течение единицы времени.

Из сказанного должно быть ясно, что единица измерения энергияла находится из опыта, и только из опыта. Это хорошо согласуется с законами термодинамики и наглядно иллюстрируется известными способами выбора единиц измерения других интенсивов: температуры, давления, электрического потенциала. Разумеется, что специфика такой сложной системы, как человек, заставляет осреднять большое число экспериментальных данных, только при этом условии могут быть получены достаточно надежные результаты.

Следовательно, за единицу измерения энергияла принимается то количество информации, которую способен воспринять в течение единицы времени средний человек определенного возраста. В качестве единицы времени целесообразно взять один год: за это время хорошо осредняются различные привходящие обстоятельства процесса научения. В качестве возраста можно выбрать 18 лет, что соответствует первому году обучения в институте; приобретение информации в институте поддается сравнительно простому контролю и учету, и, кроме того, к этому возрасту стабилизируется механизм научения человека, о чем будет сказано ниже.

Выбранная единица — среднее количество информации, приобретаемой студентом первого курса за год, — служит эталонной мерой при определении среднего энергияла для других отрезков времени и других систем (объектов). С этой мерой сравниваются все остальные энергиялы.

Таким образом, основные отправные характеристики шкалы качества мы в принципе установили. К ним относятся абсолютный нуль отсчета, некоторые реперные точки и единица измерения энергияла. Теперь предстоит конкретизировать построенную шкалу, придать ей числовое выражение, удобное для практического использования. В первую очередь необходимо определить числом

единицу качества. Это может быть сделано с помощью уравнения (70).

В полном соответствии с основным расчетным уравнением (70), описывающим информационное явление, для конкретизации выбранной единицы энергияла необходимо учесть энергию, которую затрачивает человек при его научении в течение года.

Опыт показывает, что в среднем за сутки человек потребляет с пищей и теряет в форме теплоты и работы около 3000 ккал, что примерно равно 150 Вт. Из них полезная мощность, выделяемая в виде внешней работы, составляет около 50 Вт. При умственной деятельности полезная работа обычно несколько меньше, однако для простоты мы во всех случаях будем исходить из средней мощности 50 Вт. Эта величина используется в дальнейшем при практических расчетах технологии литья.

Из-за примерного постоянства величины полезной мощности энергия оказывается пропорциональной времени. Благодаря этому энергетическую сторону процесса научения допустимо анализировать не в терминах затрат энергии, а в терминах затрат времени.

Это упрощение имеет исключительно важное значение, потому что аналогичного упрощения удастся достичь при определении с помощью единичной годовой меры количества приобретаемой информации. Это делается на основе анализа известных результатов, накопленных в экспериментальной психологии, педагогике и теории информации.

Экспериментальная психология различает вербальное и моторное научения. Первое направлено на приобретение знаний, а второе — двигательных навыков. С первым мы связываем теоретическое обучение инженера, а со вторым — научение рабочего производственным операциям. Представляет интерес также процесс, совмещающий эти две формы научения.

Кроме того, в опытах, посвященных исследованию вербального и моторного научения, принято различать объем и трудность (сложность) воспринимаемого материала. Обе эти категории — объем и сложность — несут в себе определенные количества информации, понимаемой в широком смысле. Поэтому вполне естественное расчленение общего количества информации на два смежных понятия, таких как объем информации и сложность информации, оказывается весьма плодотворным, ибо заметно облегчает использование экспериментальных данных для определения величины энергияла.

Опыт показывает, что объем и сложность, т. е. полное количество воспринимаемой информации, решающим образом зависят от длительности научения, числа повторений и т. д. Число повторений, в свою очередь, прямо связано со временем. Следовательно, не только энергия, но и количество информации может быть оценено по затратам времени. В результате все величины — энер-

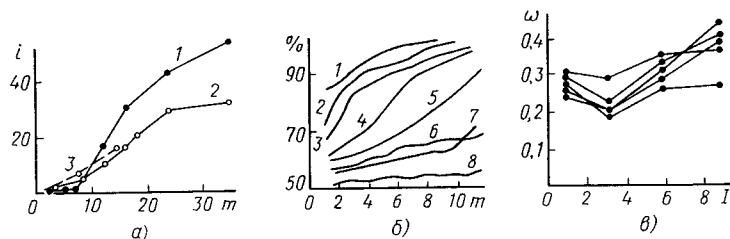


Рис. 46. Кривые вербального научения

гия, энергия и информация, — входящие в уравнение (70), оказываются функциями времени [27], [28], [30], [32].

Анализ механизма научения знаниям и навыкам. Для выяснения интересующих нас общих закономерностей научения воспользуемся обширными данными, имеющимися в литературе по экспериментальной психологии, педагогике и теории информации. Знание этих закономерностей позволит правильно поставить собственные эксперименты с литейщиками и таким образом определить искомую зависимость энергетического от времени научения. Анализ известных опытных данных начнем с обсуждения механизма вербального научения (знаниям).

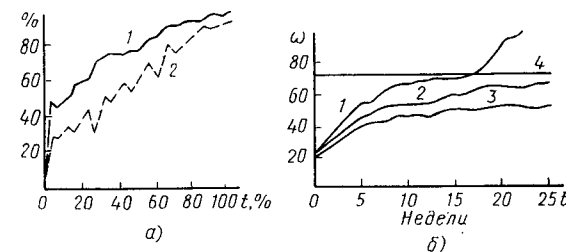
На рис. 46, а представлены кривые научения 1 (по Эббингаузу), 2 (по Мейманну) и 3 (по Ховланду), характеризующие влияние объема заученного материала (числа слогов m в списке) на число необходимых повторений i [138, с. 133]. Величина i может быть сопоставлена со временем t научения. Из рисунка следует, что при не очень малых m с увеличением объема материала скорость научения со временем возрастает.

Аналогичное повышение скорости научения наблюдается при увеличении сложности (трудности) материала. На рис. 46, б кривые 1—4 относятся к материалу в 5, 15, 50 и 100 легких единиц соответственно, а кривые 5—8 — к тому же числу трудных единиц (по Крюгеру [138, с. 132]). На оси абсцисс отложены последовательные испытания m , которые допустимо сопоставлять со временем, а на оси ординат — процент выполнения заданий. Из рисунка следует, что с увеличением сложности материала скорость научения возрастает — это видно по изменению выпуклости кривых.

На рис. 46, в изображена экспериментальная зависимость, прямо выраженная в традиционных единицах информации: ω — скорость запоминания в бит/с, а I — количество запоминаемой информации в битах (по Б. П. Невельскому). Пять кривых соответствуют пяти испытуемым. Здесь также наблюдается увеличение скорости запоминания с ростом количества информации.

Во всех случаях (рис. 46, а—в) речь идет о запоминании бессмысленного материала, например лишенных смысла слогов или

Рис. 47. Кривые моторного научения



набора цифр. При запоминании осмысленного материала скорость научения возрастает со временем сильнее, особенно при длительном (многолетнем) научении. Именно такой случай представляет для нас наибольший интерес.

Обратимся теперь к анализу механизма моторного научения (навыкам). На рис. 47, а приведены кривые простого (1) и более сложного (2) моторного научения (по Дэвису [138, с. 141]). На оси абсцисс отложено все время t упражнений в %, а на оси ординат — процент выполнения заданий. По мере усложнения заданий кривые моторного научения изменяют свою кривизну в направлении, которое характерно для вербального научения. При достаточно сложном задании скорость научения растет с увеличением сложности, об этом свидетельствуют опыты Крюгера [138, с. 141].

При моторном, как и вербальном, научении большое значение имеют мотивация действий, их осмысленность, связь с накопленными ранее знаниями. В последнем случае скорость научения с ростом объема и сложности задания увеличивается. Примером могут служить кривые, изображенные на рис. 47, б. На оси абсцисс отложено время t в неделях, а на оси ординат — число букв ω , передаваемых в минуту. Прямая 4 соответствует самой низкой скорости передачи телеграмм по магистрали (по Брайну и Хартеру [138, с. 140]). При передаче отдельных букв (кривая 3) скорость научения невелика и со временем падает, при передаче отдельных слов (кривая 2) она несколько возрастает, а при передаче связной речи (кривая 1) — существенно увеличивается: здесь объем информации сочетается с ее осмысленностью.

Для наших целей немаловажное значение имеет также механизм сохранения во времени заученного материала. Этот вопрос освещен в литературе достаточно подробно. На рис. 48, а изображены кривые 1—3 припоминания вербального материала (в %) в зависимости от места x слов в списке, состоящем из 10, 20 и 30 слов соответственно [87]. На рис. 48, б сохранение (в %) выражено в функции от числа дней t после заучивания осмысленного (кривая 1) и бессмысленного (кривая 2) материалов (по Дэвису и Муру, а также Дэвису [138, с. 167]). На рис. 48, в сопоставляется сохранение (в %) для моторного (кривая 1) и вербального (кривая

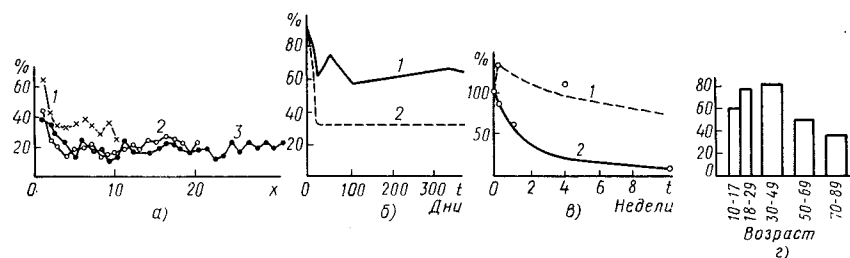


Рис. 48. Кривые сохранения

2, бессмысленный текст) научения, время t выражено в неделях (по Ливитту и Шлосбергу [138, с. 172]).

Из кривых сохранения видно, что в количественном отношении процесс забывания в целом подчиняется экспоненциальной (логарифмической) зависимости. Сохранение мало изменяется со временем на уровне 20—30% от исходной информации. Специальные опыты показывают, что у студентов сохранение достигает 1/3 от исходного лекционного материала (по В. Н. Константинову). Все эти данные хорошо согласуются между собой. Характер зависимостей оказывается одинаковым как при вербальном, так и при моторном научении.

Наконец, необходимо учесть еще возрастные особенности человека, влияющие на механизм процесса научения. На рис. 48, г приведена диаграмма оценок в зависимости от хронологического возраста (по Майлсу [138, с. 148]). Как видим, в наиболее интересующем нас активном возрасте от 18 до 49 лет способности к научению сохраняются примерно на одном и том же уровне и характеризуются максимальной оценкой 80.

Приведенные экспериментальные данные позволяют сделать следующие общие выводы, имеющие принципиальное значение для правильного понимания механизма научения и всего дальнейшего.

При повышении объема и сложности информации скорость вербального и моторного научения возрастает со временем. На величину скорости моторного научения влияют накопленные ранее знания; надо полагать, что и накопленные навыки должны не в меньшей степени увеличивать скорость вербального научения — это прямо следует из законов взаимности и увлечения. Из всего исходного (программного) материала у человека всегда остается вполне определенная доля знаний и навыков (количество обобщенной информации), причем возраст в диапазоне $\Delta t = 18 \div 49$ лет мало влияет на механизм научения.

Эксперименты с литейщиками. Найденные закономерности механизма научения позволяют рационально спланировать опыты по определению квалификации литейщика.

Предположим, что исходный программный материал литейщика содержит N некоторых (сейчас мы пока не уточняем каких именно) единиц обобщенной (вербальной и моторной), вербальной или только моторной информации. В процессе научения величина N уменьшается в k_1 раз из-за несовершенства человеческого механизма сохранения, причем, как было установлено, коэффициент k_1 близок к 1/3. Возраст вносит свои коррективы, он уменьшает начальное количество информации еще в k_2 раз. Несомненно, что и способ научения дает дополнительный коэффициент k_3 и т. д. В конечном итоге при научении в течение времени t человек фактически располагает информацией

$$I_t = N \cdot k_1 k_2 k_3 \dots \quad (104)$$

Мы условились за единицу энергияла принять то количество информации, которую способен воспринять человек в течение года. Для одного года последняя формула дает

$$I_r = N \cdot k_1 k_2 k_3 \dots$$

Мы условились также это годовое количество информации считать эталонной мерой и сопоставлять с ней все остальные энергиялы. Следовательно, при произвольном времени научения t энергиял человека равен Π эталонным годовым единицам информации (сокращенно ги), причем

$$\Pi = \frac{I_t}{I_r} = \frac{N_t k_1 k_2 k_3 \dots}{N_r k_1 k_2 k_3 \dots} \text{ ги.} \quad (105)$$

Если механизм научения в течение всего периода t остается неизменным, тогда все сходственные коэффициенты k в этом равенстве будут равны между собой и взаимно сократятся. Такие условия имеют место, как мы убедились, в диапазоне 18—49 лет. Именно поэтому в качестве эталонного возраста мы выбрали 18 лет. В рассматриваемых условиях расчетная формула для энергияла принимает вид

$$\Pi = \frac{I_t}{I_r} = \frac{N_t}{N_r}. \quad (106)$$

Для первого эталонного года научения энергиял

$$\Pi = \frac{I_r}{I_r} = \frac{N_r}{N_r} = 1.$$

Согласно формуле (106), энергиял равен отношению двух фактически приобретенных количеств информации. Одновременно он равен также отношению двух исходных программных количеств информации.

Формула (106) весьма замечательна по многим причинам. Прежде всего из нее следует, что энергиял не зависит от конкрет-

ного физического механизма функционирования системы, которая приобретает или вырабатывает информацию. Важно лишь, чтобы этот механизм оставался неизменным.

Мощность и энергия, затраченная системой на приобретение или выработку данной информации, также не играют никакой роли. Это прямо вытекает из уравнения (70), согласно которому

$$\Pi = \frac{dW}{dU} = \frac{\Pi dU}{dU} = \frac{\Pi}{1} = \Pi. \quad (107)$$

Отсюда ясно, что сформулированный нами метод определения энергетического (количества информации) является весьма универсальным. Это дает право распространять его и полученные с его помощью результаты на любые системы (объекты), различающиеся своими устройствами, мощностью и т. д. Например, роль обсуждаемых систем могут играть человек, мощная ЭВМ, карманный калькулятор и т. п. Это является важнейшим принципиальным достоинством предлагаемого метода.

Исключительно большое практическое значение для наших целей имеет то обстоятельство, что энергетический может быть найден не только через фактически приобретенную, но и через исходную (программную) информацию. А программная информация определяется неизмеримо проще, чем усвоенная.

Более того, программная информация входит в равенство (106) в виде отношения. Это значит, что саму информацию можно измерять в любых подходящих единицах, поскольку размерности сокращаются.

Следовательно, если говорить о вербальном научении литейщика и иметь в виду только объем информации, то в качестве единицы измерения последней целесообразно выбрать объем исходного программного материала, выраженного, например, непосредственно в печатных листах (п. л.). Этот объем легко находится из опыта при обучении студентов в институте и техникуме и учеников в школе.

В соответствии с изложенным была обследована литейная специальность Белорусского политехнического института (БПИ). Для сравнения были привлечены также данные о студентах Белорусского государственного университета (БГУ), учащихся техникума и школьников.

Сопоставление различных специальностей показывает, что разница в объемах программного материала получается незначительной. За единицу объема информации при вербальном научении на первом курсе института, что соответствует эталонному возрасту 18 лет, можно принять среднее значение $\Delta N = 440$ п. л. Величина ΔN фактически представляет собой скорость научения, точнее скорость поступления программной информации, $\Delta N/\Delta t$, так как отрезок времени Δt считается равным одному году.

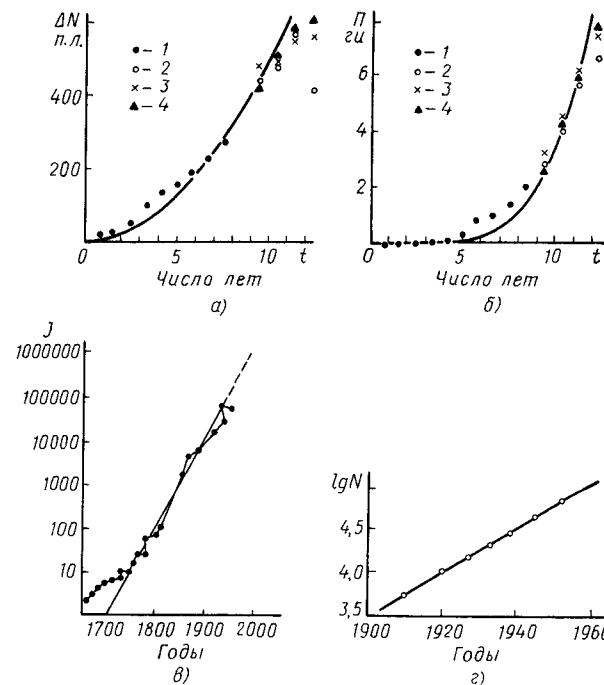


Рис. 49. Кривые научения (а и б) и выпуска журналов в мире (в) и статей в США (г)

При определении величины ΔN для различных лет научения были использованы учебные программы и относящиеся к ним учебники, учебные и наглядные пособия, конспекты. Результаты обследования приведены на рис. 49, а, где 1 — ученики средней школы; 2 — студенты БПИ, специальность литейное производство; 3 — студенты БГУ, теплофизика; 4 — то же, физика твердого тела. За основу принята длительность работы студентов в году, равная 3000 ч в год (В. В. Гамалий), для школьников и учащихся техникумов данные пересчитаны на 2500 ч в год, но поправка на возраст не внесена.

Для удобства практических расчетов связь между скоростью и временем научения целесообразно приблизительно отобразить с помощью следующего простейшего уравнения параболы n -го порядка:

$$M_N = \frac{\Delta N}{\Delta t} = k_N t^n, \quad (108)$$

где M_N — скорость научения; k_N — опытный коэффициент; t — длительность научения; n — опытный показатель степени.

Чтобы количество информации, найденной с помощью печатных листов, выразить в принятых нами универсальных единицах Π , надо левую и правую части этого уравнения разделить на эталонное годовое число N_r — из формулы (106). Получаем

$$M = \frac{\Delta \Pi}{\Delta t} = kt^n. \quad (109)$$

Согласно этой формуле, при $n = 1$ скорость научения пропорциональна времени (прямая линия). При $n < 1$ скорость со временем падает, кривая обращена выпуклостью в направлении от оси t . При $n > 1$ скорость возрастает, кривая обращена выпуклостью к оси t .

В общем случае показатель n , как и коэффициент k , должны зависеть от длительности научения, количества воспринятой информации, механизма научения, способностей научаемого, его возраста и т. д. Это хорошо иллюстрируется известными данными, приведенными на рис. 46 и 47. Из этих данных, в частности, следует, что показатель n для вербального научения имеет значения больше единицы, особенно это касается запоминания осмысленного материала в течение длительного времени.

В нашем случае обработка по методу наименьших квадратов экспериментальных данных, приведенных на рис. 49, а, дает показатель $n_o \cong 2$, где индекс «о» относится к объему информации. Соответствующая кривая изображена на рисунке сплошной линией.

Сложность информации тоже может быть описана формулой (109). Поскольку известные опытные данные говорят об идентичном характере влияния объема и сложности на скорость научения, постольку в первом приближении можно принять $n_c \cong 2$, где индекс «с» относится к сложности информации.

Таким образом, влияние объема и сложности информации определяется равенствами типа (109):

$$M_o = k_o t^{n_o}; \quad M_c = k_c t^{n_c}.$$

Эти равенства можно объединить на основе следующих соображений.

Каждая единица объема информации Π_o несет в себе определенную сложность Π_c , поэтому полное (суммарное) количество информации Π , накопленной к моменту t и одновременно учитывающей ее объем и сложность, находится из дифференциального уравнения

$$d\Pi = M_o M_c dt = k_o k_c t^{n_o + n_c} dt.$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$\Pi = kt^n, \quad (110)$$

где

$$k = \frac{k_o k_c}{n}; \quad n = n_o + n_c + 1.$$

Эта формула содержит искомую связь между энергиялом и длительностью научения литейщика.

Расчетная формула для определения квалификации литейщика. Имеющихся экспериментальных данных вполне достаточно для того, чтобы найти необходимые при практических расчетах значения величин k и n , входящих в равенство (110). Имеем [31]

$$\Pi = 3,26 \cdot 10^{-5} t^5 \text{ ги}. \quad (111)$$

Здесь время t выражено в условных годах, содержащих каждый по 3000 ч научения; энергиял — в соответствующих годовых единицах информации, причем годовая (ги) и часовая (чи) единицы связаны между собой соотношением: 1 ги = 3000 чи; коэффициент $k = 3,26 \cdot 10^{-5} \text{ ги/г}^5$; показатель $n = 5$.

Зависимость (111) графически представлена на рис. 49, б в виде сплошной линии, точки соответствуют экспериментальным данным, обозначения те же, что и на рис. 49, а. За начало научения условно принят момент поступления ученика в школу. Известная условность такого нуля принципиального значения не имеет. Наглядным примером тому может служить термодинамика, где вместо абсолютного нуля температуры в большинстве случаев практики применяют условный нуль, соответствующий температуре плавления льда. Одновременно в термодинамике существует и абсолютная шкала температуры. Энергиял тоже имеет свою абсолютную шкалу, но она пока имеет только теоретическое значение.

При расчетах технологии литья годовая единица информации часто бывает слишком крупной. Если энергиял выразить в часовых единицах информации, то формула (111) приобретает вид

$$\Pi = 4 \cdot 10^{-4} \left(\frac{t}{1000} \right)^5 \text{ чи}. \quad (112)$$

Сюда длительность научения t подставляется в часах. Эта формула удобнее, чем (111), так как исключается необходимость пересчета часов на условные годы научения.

Учитывая принципиальное сходство механизмов вербального и моторного научения (рис. 46 и 47), расчетную формулу (112) в первом приближении можно использовать также и для определения энергияла рабочих. В данном случае при пересчете часовой информации на условную годовую следует иметь в виду, что длительность научения (и работы) рабочего в течение года составляет около 2000 ч. Эта величина является средней для различных специальностей.

Расчетная формула (112) служит основой при определении квалификации литейщика (персонала), а следовательно, и при расчетах изложенными выше методами совершенства литейного оборудования, качества кокиля и отливки и эффективности производства. Применение формулы (112) начнем с вычисления энергияла людей — школьников, студентов, техников, инженеров и рабочих. Соответствующие данные можно заимствовать из рис. 49, б, но более удобно пользоваться следующей таблицей, где энергиял выражен в единицах часовой информации, или чи [31]:

Ученик 10-го класса	3 940
Студент I курса	6 940
Техник	9 790
Инженер III категории . . .	41 300
II категории	114 000
I категории	264 000

Для рабочих время научения регламентируется тарифно-квалификационным справочником [55]. Фактическое время по данным ММЗ [28] указано в табл. 12. В приведенных ниже расчетах энергияла для рабочих, как и в случае инженеров и техников, использовано нормативное время. Соответствующие значения энергиялов даны в табл. 13.

Таблица 12

Фактическое среднее время научения рабочих разных профессий в годах

Профессия	Разряд					
	1	2	3	4	5	6
Рабочие по приготовлению смеси	0,5	1,5	9,0	—	—	—
Формовщики	0,5	1,2	3,5	4,0	8,0	—
Стерженщики	0,3	1,2	3,0	6,5	10,5	—
Заливщики	—	0,7	3,0	6,0	—	—
Обрубщики	0,5	1,2	3,0	5,0	—	—
Прессовщики (горячая штамповка)	—	0,5	3,7	7,0	—	—
Прессовщики (холодная штамповка)	0,3	1,2	3,2	4,5	8,0	—
Автоматчики	—	0,5	5,0	3,6	5,0 *	9,0 *
Зуборезчики	—	0,5	3,0	6,2	8,5 *	12,5 *
Сверловщики	0,25	2,0	4,4	7,3	—	—
Резчики на пилах	—	0,5	7,8	—	—	—

* Единичный случай.

Таблица 13
Средние энергиялы рабочих

Разряд	1	2	3	4	5	6
Минимальный срок t научения, годы (норма) . . .	—	0,5	1,5	3,5	6,5	10,5
То же, часы	—	1000	3000	7000	13 000	21 000
Пр. чи	—	$4 \cdot 10^{-4}$	$9,79 \cdot 10^{-2}$	6,77	150	1 650
Часовая тарифная ставка, коп.	53,9	58,6	64,8	71,4	80,7	92,4

Если время научения (или работы) имеет промежуточные значения, не указанные в таблицах, то энергиял следует определять непосредственно по формуле (112).

Найденные здесь величины энергияла были использованы во всех прежних примерах расчетов качества кокиля и отливки, а также эффективности производства (см. с. 119—147). При этом энергиял везде был выражен в часовых единицах информации.

Простое сопоставление данных, приведенных в таблицах и упомянутых примерах, позволяет сделать ряд интересных для практики выводов, которые имеют прямое числовое обоснование. Прежде всего мы замечаем, что качество продукта (кокиля и отливки), совершенство оборудования, а следовательно, и общий уровень развития и культуры производства определяются главным образом энергиялом инженера. Поэтому надо особое внимание обращать на повышение квалификации инженерного состава.

Кроме того, согласно табл. 13, энергиял рабочего растет почти на семь порядков быстрее, чем тарифные ставки. Следовательно, на повышение квалификации рабочего тоже целесообразно не жалеть средств.

Сравнение различных статей расхода средств при производстве отливок показывает, что затраты на содержание рабочих превышают все остальные затраты. Например, расходы на зарплату почти на два порядка выше, чем расходы на амортизацию оборудования и электроэнергию. Следовательно, важнейшей задачей является всемерная автоматизация и механизация всех работ — в этом надо видеть главное направление производственного прогресса. При этом одновременно уменьшается число рабочих, обслуживающих данный технологический процесс (расходы на зарплату), и возрастают совершенство оборудования и качество продукта. Сроки замены оборудования определяются диаграммами типа рис. 45.

Заметим, что основная расчетная формула (112), определяющая квалификацию литейщика, является приближенной. Для ее уточнения целесообразно поставить дополнительные опыты.

При экспериментальном изучении сложности вербальной информации можно прибегнуть, например, к методу ее приближенного определения через объем и время научения [31]. При этом возможны два варианта. В первом случае данный материал, подлежащий запоминанию, методом проб расчленяется на порции с равным временем научения. Разница в их объемах будет свидетельствовать о сложности малых порций, причем за эталон могут быть взяты большие порции минимальной сложности: сложность малой порции во столько раз больше сложности эталонной, во сколько раз объем эталонной больше объема малой порции.

Во втором случае весь сложный материал можно удлинить, расшифровав и упростив так, чтобы все его порции имели одинаковую минимальную сложность. Тогда о сложности данного материала можно судить по объему удлиненного: данный материал сложнее удлиненного во столько раз, во сколько различаются их объемы. Разумеется, в опытах особое внимание следует обратить на специфику усвоения больших количеств информации в течение длительных сроков научения. Таких данных пока еще очень немного. Соответствующие эксперименты со студентами сейчас проводятся в МВТУ (А. И. Вейник, В. В. Ищенко, Е. А. Соколов, М. К. Шарипова и др.).

На практике вербальное и моторное научения обычно сочетаются друг с другом. Их взаимное влияние может быть учтено с помощью законов взаимности и увлечения.

Интересно сравнить механизм научения и выработки информации отдельным человеком и совокупностью людей (обществом). На этой основе нетрудно прийти к сравнительной информационной оценке общего уровня развития науки и техники. Например, на рис. 49, а и б показана зависимость числа издаваемых научно-технических журналов J (во всем мире) и статей N (в США) от времени (по А. И. Михайлову, А. И. Черному, Р. С. Гиляревскому). Эта зависимость отвечает не степенному, как для отдельного человека, а экспоненциальному закону (так называемый информационный взрыв):

$$П = ke^{nt}, \quad (113)$$

где

$$k = \frac{k_0 k_c}{n}; \quad n = n_0 + n_c.$$

Приняв за единицу годовой информации (ги) то количество информации, которая была выработана обществом в 1901 г., по данным рис. 49, а получаем $k = 1,1 \cdot 10^{-75}$ ги; $n = 0,092$ 1/г, а из рис. 49, б находим $k = 8,3 \cdot 10^{-99}$ ги; $n = 0,12$ 1/г. Здесь обе единицы годовой информации отличаются друг от друга. Они ничего общего не имеют с введенной ранее единицей для отдельного человека.

Анализ полученных соотношений свидетельствует о том, что интенсивность второго процесса оказывается заметно выше интенсивности первого, об этом можно судить по значениям показателя n . С начала нашей эры и до 1901 г. человечеством было выработано всего примерно 10 ги информации, а к 2001 г. будет выработано 10^6 ги. Наверняка, количество информации в мире будет расти главным образом не из-за увеличения объема («о»), в частности числа журналов, как показано на рис. 49, а штриховой линией, а благодаря повышению сложности («с») информации. Это вынуждает поставить соответствующие опыты для выяснения и уточнения деталей механизма роста объема и особенно сложности информации у индивидуума и общества в целом.

Специфические характеристики качества. Все рассмотренные выше значения энергияла характеризуют среднее качество кокиля и отливки, среднее совершенство оборудования, среднюю квалификацию литейщика — это прямо вытекает из уравнения (70).

Разумеется, средняя величина энергияла весьма интересна, так как определяет общий уровень развития данного производства, и поэтому позволяет сделать много важных выводов, имеющих принципиальное значение. Однако на практике нередко возникает потребность дополнительно знать еще многие конкретные специфические свойства кокиля и отливки, например их размерную точность, состояние поверхности, твердость, прочность на разрыв, структуру, усадочные дефекты и т. п. Очевидно, что средний энергиял для дифференцированной оценки подобных частных свойств совершенно непригоден.

В связи с этим перед нами встает новая проблема — распространить изложенный метод расчета энергияла на все возможные специфические характеристики качества продукта. Эта новая трудность преодолевается сравнительно просто, если вспомнить, что энергиял представляет собой количество обобщенной информации. Благодаря этому проблема специфических характеристик качества сводится к известной проблеме семантики (смыслового значения) информации, а эта последняя в рамках обсуждаемого метода решается следующим образом.

Рассматривается совокупность интересующих технолога понятий. В их число могут входить размерная точность, состояние поверхности, твердость, прочность, пористость и т. д. Каждому такому понятию π сопоставляется определенное количество выработанной или накопленной литейщиком информации, т. е. определенный энергиял Π . В совокупности получается смысловой спектр понятий, аналогичный цветовому спектру частот излучения в электромагнитных явлениях (вспомним законы Планка и Вина для спектральной интенсивности излучения абсолютно черного тела).

Таким образом, теперь становится ясно, что энергиял Π фактически представляет собой специфическую (спектральную) характеристику качества. Ранее мы на этом обстоятельстве внимание не заостряли, а говорили лишь о среднем значении энергияла. Сейчас придется уже дифференцировать как свойства продукта, так и воспринимаемую литейщиком информацию при его научении. Литейщик способен обеспечить данную специфическую характеристику качества отливки только в том случае, если располагает нужным спектральным значением энергияла. В остальном все изложенные выше расчетные формулы и методы сохраняют свою силу. Конкретным примером спектральной характеристики качества может служить размерная точность отливки, рассмотренная в параграфе 5.

В общем случае смысловой спектр качества имеет вид функции

$$\Pi = \Pi(\pi), \quad (114)$$

которая выражает энергиял Π через понятия λ . Эта функция может рассматриваться как непрерывная, ибо любое понятие всегда несколько размазано по координате λ . Правда, у отдельных частных объектов (лиц или устройств) могут отсутствовать какие-то понятия, быть какие-то пробелы. Тогда спектр энергияла становится дискретным, линейчатый. Однако путем соответствующей компоновки имеющейся информации — изъятия пробелов — любой линейчатый спектр всегда можно сделать непрерывным и, следовательно, применять к функции $\Pi(\pi)$ известные правила дифференцирования и интегрирования.

Заметим, что в области пробелов передача информации в принципе невозможна, так как в наличии нет движущей причины переноса — нужной разности энергиялов. Объект, готовый к восприятию данной информации, всегда располагает в своем спектре необходимым понятием и соответствующим ему энергиялом, пусть даже равным нулю. В последнем случае скорость передачи информации максимальна, поскольку перенос энергии происходит под действием наибольшей возможной разности энергиялов.

Если проинтегрировать функцию $\Pi(\pi)$ по π , то получится полное количество информации V , которой располагает данная система. Имеем

$$V = \int_{\Delta\pi} \Pi(\pi) d\pi, \quad (115)$$

где $d\pi$ — элементарная ширина смысловой полосы спектра. Соответствующее этой полосе элементарное количество информации

$$dV = \Pi d\pi. \quad (116)$$

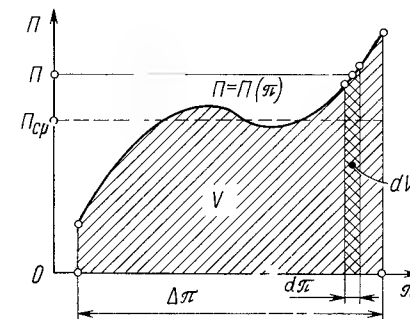
Пределы интегрирования в уравнении (115) выбирают в зависимости от характера решаемой задачи. Поскольку количество обобщенной информации определяет уровень эволюционного развития поведения, постольку для сложной системы, например Вселенной, полное число возможных понятий равно бесконечности, а пределы интегрирования составляют 0 и ∞ . При решении конкретных литейных задач можно довольствоваться небольшим количеством необходимых понятий.

В общем случае понятия должны располагаться в многомерной системе координат. На практике, однако, приходится иметь дело с ограниченным набором понятий $\Delta\pi$. В этих условиях весь спектр понятий удается легко изобразить на плоскости, расположив их на оси абсцисс по алфавиту (от А до Я), по числам, как в УДК (очень удобный прием сведения многомерной задачи к одномерной!), либо по каким-нибудь другим признакам (рис. 50).

Для наименования совокупного количества информации V , которой располагает специалист, или устройство, мы воспользуемся латинским словом воко (voco — звать, называть). Как видим, воко и известный из литературы тезаурус играют похожие роли, однако они отвечают принципиально различным подходам, поэтому смешивать эти два понятия невозможно.

Для удобства практических расчетов совокупное количество информации системы — общий воко V — целесообразно расче-

Рис. 50. Смысловый спектр и воко энергияла



нить на несколько отдельных частных видов воко. Главными из них, имеющими важное прикладное значение, являются четыре: воко знаний V_D , воко навыков (умения, труда) V_L , воко желаний (потребности, необходимости) V_W и воко собственности (принадлежности) V_P .

Большое D -воко (знаний) свидетельствует о высокой эрудиции специалиста (или ЭВМ), большое L -воко (навыков) — о высокой его квалификации, умении решать нужные практические задачи. Величина W -воко (желаний) говорит о целенаправленности действий, о желании, потребности и необходимости успешно справиться с поставленной задачей; по понятным причинам этот вид воко труднее всего определить, но без него не всегда можно прийти к правильным выводам. P -воко (собственности) характеризует тот запас материальных и людских ресурсов, которыми располагает специалист, производство и т. д. и которые предназначены для выполнения поставленной задачи.

Перечисленных частных видов воко вполне достаточно для всестороннего количественного анализа большинства производственных, экономических, информационных и иных задач. Например, в эти воко хорошо укладывается следующий комплекс требований, к которым иногда обращаются социологи с целью оценки профессиональной пригодности того или иного специалиста: знает, умеет, хочет... В совокупности указанные воко содержат полный набор потребных спектральных характеристик Π для конкретных понятий $\Delta\pi$, относящихся к свойствам производимого продукта, персонала, оборудования и т. д.

Таким образом, спектральная величина Π характеризует свойства системы применительно к каждому конкретному понятию, к каждой конкретной операции, воко V — суммарные свойства системы, а среднее количество информации $\Pi_{ср}$ — средний уровень развития системы. Среднее значение энергияла $\Pi_{ср}$ определяется путем деления воко на ширину смысловой полосы спектра понятий $\Delta\pi$. Сказанное иллюстрируется рис. 50, где воко равно заштрихованной площади.

Все предыдущие расчетные формулы, включая основное уравнение (70), справедливы как для осредненных, так и для спектральных величин. При расчетах какой-нибудь конкретной специфической характеристики качества кокиля или отливки надо знать соответствующий спектральный энергиял, относящийся к данному

свойству и мероприятиям, специально предназначенным для получения именно этого свойства. В частности, надо располагать знаниями упомянутого энергетика для всех звеньев технологической цепи: инженера-конструктора, инженера-технолога, рабочего, оборудования и материалов, обеспечивающих получение заданного специфического качества продукта. Эти значения находятся из соответствующих воко. Энергия переносится в цепи под действием спектральной разности $\Delta\P$. Информоемкости, информосопротивления и другие характеристики звеньев также имеют специфический смысл и выбираются из соответствующих таблиц или диаграмм типа воко.

Прочие свойства качества. Чтобы при выполнении практических расчетов литейной технологии избежать неясностей и ошибок, вызванных информационной терминологией, необходимо дополнительно рассмотреть общие принципиальные свойства энергетика и сравнить их со свойствами традиционного количества информации. Известные термины и представления теории информации позволяют придать методу расчета качества и эффективности исключительную наглядность. Но в основном изложенная термодинамическая теория ничего общего не имеет с традиционной теорией информации. Именно по этой причине последняя теория не может быть привлечена для оценки качества и эффективности. Анализ начнем с обсуждения свойств энергетика, или количества обобщенной информации, для удобства сравнения будем пользоваться терминами теории информации.

Согласно термодинамической теории, любой интенсификатор (температура, давление и т. п.) обладает свойством абсолютности. В частности, для каждого интенсификатора существует и может быть найден свой абсолютный нуль отсчета — вспомним абсолютную температуру, абсолютное давление и т. д. Энергетик, или количество обобщенной информации, является интенсификатором, следовательно, ему тоже должно быть присуще свойство абсолютности.

Здесь очень важно подчеркнуть, что свойство абсолютности надо понимать не в житейском («абсолютно точно», «абсолютно правильно»), а в термодинамическом смысле. С термодинамической точки зрения абсолютность означает только то, что количество информации должно иметь свой абсолютный нуль отсчета и не должно зависеть от каких бы то ни было свойств источника, потребителя (адресата) или канала связи, например от имеющейся предварительной информации источника и потребителя.

Сказанное также означает, что абсолютное количество информации по существу одновременно выражает и ее абсолютную ценность. Это дает право не делать различия между такими двумя понятиями, как количество и ценность информации. Так сама собой естественно и просто решается труднейшая и очень актуальная проблема определения ценности информации. Ценность, обусловленная потребностями и особенностями индивидуума, учитывается, например, посредством воко желаний.

Свойство абсолютности информации накладывает определенный термодинамический отпечаток и на процесс ее «распространения». Так, если источник и потребитель располагают некоторыми абсолютными значениями количества информации, то ее «передача» от источника к потребителю возможна только в том случае, когда информация первого превышает информацию второго. При этом информация источника и потребителя не могут зависеть одна от другой, предварительная информация потребителя в состоянии повлиять лишь на количественную сторону эффекта «передачи», определяемого разностью информаций $\Delta\P$ источника и потребителя. Потери информации в процессе «передачи» характеризуются информосопротивлением R канала связи (см. с. 112—115).

Именно такая картина наблюдается, например, при передаче теплоты между двумя телами. Излучающее тело (источник теплоты) имеет абсолютную температуру (интенсификатор), не зависящую от абсолютной температуры поглощающего (потребителя). Теплота передается от тела с большей температурой к телу с меньшей, этот процесс сопровождается повышением температуры холодного тела. Количественная сторона эффекта передачи и нагрева холодного тела определяется разностью температур, термическим сопротивлением промежуточной среды (канала связи) и теплоемкостью потребителя. При этом важно подчеркнуть, что имеет место передача теплоты (экстенсор), а не температуры (интенсификатор). Температура способна только изменяться в процессе передачи теплоты.

Аналогично в информационных явлениях переносится (распространяется) не информация Π (интенсификатор), а энергия U (экстенсор). Этот процесс происходит под действием разности энергетиков $\Delta\P$. Следовательно, с термодинамической точки зрения известное представление о «передаче» информации является нестрогим, поэтому соответствующее слово мы заключаем в кавычки. Информация способна лишь изменяться в процессе передачи энергии, причем скорость изменения информации обратно пропорциональна информоемкости K системы.

Количество информации, подобно любому другому интенсификатору, способно изменяться даже в изолированной системе. Факт «творения» (возникновения) либо исчезновения информации не содержит в себе ничего таинственного или непонятного. Имеется несколько механизмов повышения или уменьшения величины энергетика. Одни из них определяются уравниванием состояний (82), согласно которому количество информации способно возрастать в изолированной системе, например под влиянием других степеней свободы — термической, электрической, механической и т. д. Второй механизм подчиняется уравнению переноса (88) с его эффектами увлечения, третий — уравнению диссипации (90). Наконец, четвертый механизм связан с круговыми процессами, в которых одни интенсификаторы изменяются за счет других; например, в тепловом двигателе среднее индикаторное давление рабочего тела возрастает за счет уменьшения средней температуры последнего, и т. д.

Все сказанное относится к свойствам количества обобщенной информации, или энергетика. Энергетик выбран нами по правилам термодинамики необратимых процессов, поэтому он обязан подчиняться и подчиняется всем ее законам и уравнениям. Именно эти законы и уравнения наделяют энергетик описанными свойствами, они положены в основание термодинамического метода расчета качества и эффективности.

Перейдем теперь к обсуждению свойств традиционного понятия информации. По Шеннону, количество информации, содержащейся в сообщении о некотором событии (опыте),

$$H = - \sum_{i=1}^{i=n} P_i \log_2 P_i, \quad (117)$$

где P_i — вероятность осуществления i -го исхода данного события (опыта); n — общее число возможных исходов.

Простейшим и наиболее показательным опытом, подчиняющимся уравнению (117), может служить, например, извлечение наудачу из урны белого или красного шара.

Теория информации Шеннона предназначена автором для оценки способов кодирования и технических устройств, передающих сообщения по каналам связи. С этими своими функциями теория Шеннона справляется превосходно. Но ее часто пытаются использовать за пределами указанных функций — в биологии, социологии даже эстетике; это ведет к явным или скрытым недоразумениям, о чем предупреждал и сам автор теории (И. А. Полетаев).

Сравнительный термодинамический анализ показывает, что между количеством информации Шеннона H и энергетиком Π существуют принципиальные различия. Например, в одном и том же опыте мы можем выработать совершенно различные количества информации, ибо они находятся в зависимости от объема

предварительных знаний, которыми мы располагаем. В частности, если мы заранее знаем, что в урне помещаются белый и красный шары ($n = 2$), то извлечение наудачу белого шара даст нам один бит информации. Если цвета шаров нам не известны, тогда извлечение того же белого шара даст нам уже значительно большую информацию — все зависит от числа n возможных цветов. Таким образом, данному опыту мы не можем сопоставить определенное абсолютное значение величины H — это именуется индетерминизмом.

Весьма существенно, что количества выработанной нами в опыте и переданной в сообщении потребителю информации между собой жестко не связаны. Например, если мы знаем больше потребителя, то выработаем меньше информации, чем получит ее по каналу связи потребитель, и наоборот. Это явно нарушает привычную логику взаимоотношений между источником (нами) и потребителем, диктуемую известными законами переноса термодинамики необратимых процессов. Кроме того, информация передается не под действием разности ΔH .

В итоге количество информации H приобретает смысл не абсолютной, а относительной, субъективной, индетерминистской характеристики, зависящей от наших и потребителя случайных свойств (предварительной информации). Это лишает нас возможности по величине H судить о ценности информации, выработанной в данном опыте. Мы ничего не можем сказать и о семантике (смысловом значении) информации, ибо, например, равные количества информации H содержатся в сообщениях об извлечении из урны белого или красного шара, хотя белый и красный цвета далеко не тождественны.

Описанные свойства величины H есть закономерное следствие тех исходных посылок (парадигмы [32, с. 7], [85]), которые были положены в основу построения традиционной теории информации, — речь идет о случайных явлениях и вероятностях, без них при решении проблемы кодирования и передачи сообщений по каналам связи Шеннон обойтись не мог. В противоположность этому парадигма термодинамической теории информации отличается детерминизмом [32, с. 7]. Информационные экстенсор (энергия) и интенсил (количество обобщенной информации, или энергия) выбраны в полном соответствии с правилами термодинамики необратимых процессов. Отсюда следует, что выработка обобщенной информации, ее «передача», хранение, преобразование и т. д. — все это должно происходить при строгом соблюдении законов термодинамики. Именно это делает величины Π и H и их свойства принципиально не похожими друг на друга и исключает возможность применения шенноновского количества информации для расчетов качества и эффективности. Между тем, такие попытки известны.

7. ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ

Расчет на ЭВМ технологии литья по заданным механическим свойствам чугуна. Универсальные критерии качества и эффективности, рассмотренные в предыдущих параграфах, позволяют дать объективную числовую оценку любому данному технологическому процессу и успешно выбрать из большого числа вариантов наилучший. В этом вопросе большую помощь, благодаря своему быстрдействию, может оказать ЭВМ. Ниже приводятся различные конкретные примеры применения ЭВМ для расчета кокильной технологии.

Одновременно, как уже отмечалось, универсальные критерии качества и эффективности могут быть положены в основание методов автоматизированного проектирования. В этом направлении сейчас проводится большая работа. При автоматизированном проектировании, помимо традиционного способа применения ЭВМ, намечается также вторая возможность, основанная на использова-

нии обобщенных термодинамических подходов. Об этом более подробно говорится в конце параграфа.

В настоящее время ЭВМ широко применяется для расчетов литейной технологии в различных научно-исследовательских и учебных институтах и на заводах (МВТУ, НИИСЛ, БПИ и т. д.). Одним из пионеров разработки многих традиционных методов проектирования на ЭВМ технологии литья в кокиль является Н. А. Буткевичюс, объединивший вокруг себя в Каунасском политехническом институте целую школу литейщиков и математиков. Представители этой школы получили аналитические решения многочисленных задач о температурных полях и напряжениях, возникающих в формирующейся отливке и кокиле. Найденные решения положены в основание методов выбора технологии, которая обеспечивает заданные свойства отливки при оптимальных условиях работы кокиля. Приведем несколько конкретных примеров расчетов, выполненных на ЭВМ Н. А. Буткевичюсом и его школой. Начнем с выбора технологии по заданным механическим свойствам чугуновой отливки, охлаждающейся в чугунном кокиле.

Чтобы рассчитать на ЭВМ прочность и твердость чугуна, требуется знать закономерные связи, существующие между параметрами технологии, процессом формирования отливки и ее свойствами. Необходимые связи дает термодинамика необратимых процессов, в частности она позволяет установить, что переход от технологии к свойствам всегда бывает однозначным. Обратный же переход — от заданных свойств к потребной технологии — многозначен, т. е. данные свойства изделия можно получить с помощью самых разнообразных технологических приемов. При этом в качестве связующего звена между технологией, формированием отливки и свойствами изделия может быть с успехом использована скорость затвердевания металла u (см. с. 33). Благодаря этому открываются широкие перспективы для применения ЭВМ, которая позволяет в каждом отдельном случае выбрать наилучшую технологию, обеспечивающую заданные свойства изделия в условиях конкретного завода. Но для этого должна быть заранее определена зависимость свойств от скорости u . Тогда ЭВМ по известной скорости легко подберет нужный вариант технологии.

В настоящее время для этих целей наиболее подходящим является один из вариантов упомянутой выше (см. с. 33) структурной диаграммы для чугуна Г. Ф. Баландина (рис. 51), которая связывает скорость $u = d\xi/dt$ (где ξ — толщина затвердевшей корки, t — время), состав чугуна и его свойства [21, с. 190]. При этом состав приближенно учитывается с помощью углеродного эквивалента:

$$C_s = C\% + Si\% + 0,05(P\% - 0,2) - (Mn\% - 1,7S\% - 0,464). \quad (118)$$

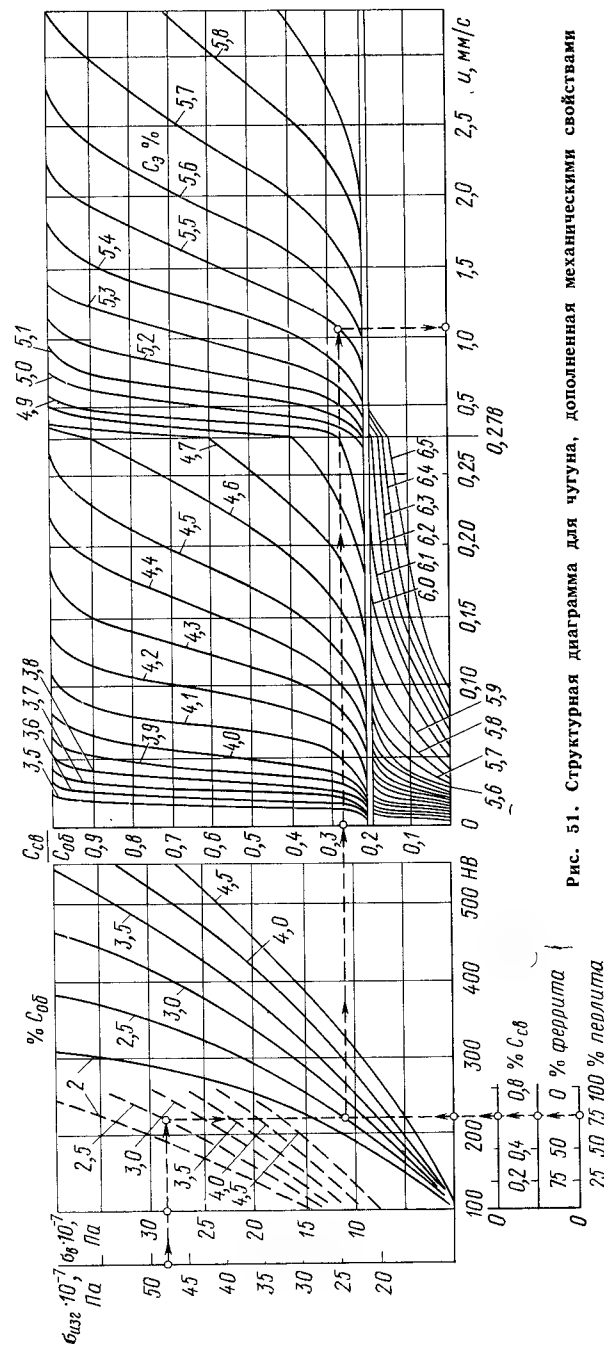


Рис. 51. Структурная диаграмма для чугуна, дополненная механическими свойствами

Здесь наиболее существенную роль играют, конечно, углерод и кремний.

На правой части диаграммы показана зависимость относительного количества связанного углерода $C_{св}/C_{об}$ (где $C_{св}$ — количество связанного углерода, $C_{об}$ — общее количество углерода) от скорости затвердевания для различных углеродных эквивалентов. В левой части относительная величина $C_{св}/C_{об}$ сопоставляется с твердостью чугуна НВ для различных значений $C_{об}$ (сплошные кривые), причем внизу представлены дополнительные шкалы, характеризующие количество связанного углерода $C_{св}$, феррита и перлита (%). Штриховые кривые на левой части диаграммы выражают прочность чугуна на разрыв σ_b и на изгиб $\sigma_{изг}$ через твердость НВ для различных $C_{об}$.

Если заданы требуемые механические свойства изделия (прочность, твердость), то по ним вначале с помощью штриховых кривых определяется общее количество углерода. Затем для найденной величины $C_{об}$ с помощью сплошных кривых определяются $C_{св}/C_{об}$, углеродный эквивалент и требуемая скорость затвердевания. Все эти построения изображены на диаграмме стрелками.

Найденная скорость обеспечивается соответствующими параметрами технологии, которые выбираются на основе имеющихся решений задачи об охлаждении отливки в форме. Выбор осуществляется с помощью ЭВМ, в которую могут быть заложены данные структурной диаграммы, аналитические решения, производственные возможности цеха и экономические показатели.

Многочисленные расчеты, выполненные на ЭВМ Н. А. Буткевичусом и В. П. Дагисом, позволяют построить специальную номограмму для быстрого определения в заводских условиях скорости затвердевания чугуна в кокиле, который охлаждается на воздухе при естественной конвекции (рис. 52). Эта скорость (мм/с)

$$u = \frac{0,03}{X_2} u_n, \quad (119)$$

где X_2 — толщина стенки кокиля, м; u_n — скорость, найденная по номограмме.

На номограмме через $T_{2н}$ обозначена начальная температура кокиля, К; критерий

$$Bi_2 = \frac{\beta_{кр}}{\lambda_2} X_2, \quad (120)$$

где $\beta_{кр}$ — коэффициент теплопередачи через слой кокильной краски, Вт/(м²·К);

$$\beta_{кр} = \frac{\lambda_{кр}}{X_{кр}};$$

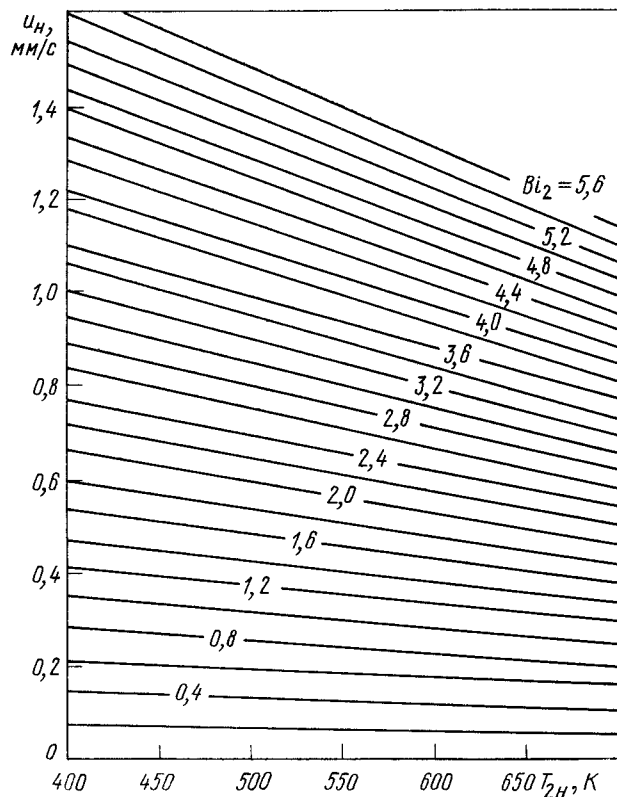


Рис. 52. Номограмма для определения скорости затвердевания чугуниной отливки в чугунном кокиле

$\lambda_{кр}$ — теплопроводность краски, Вт/(м·К); $X_{кр}$ — толщина слоя краски, м; λ_2 — теплопроводность материала кокиля, Вт/(м·К).

Если температура заливаемого чугуна сильно отличается от $T_{зал} = 1580$ К, а отношение толщины кокиля к половине толщины отливки X_1 (м), т. е.

$$m = \frac{X_2}{X_1}, \quad (121)$$

от значения 2, тогда в скорость u_n вносится особая поправка [25, с. 114]. В приближенных расчетах эта поправка не учитывается. При малых Bi_2 она ничтожно мала и ею можно пренебречь.

Расчеты на ЭВМ показывают, что номограммой, изображенной на рис. 52, можно пользоваться для определения скорости затвер-

девания отливки любой конфигурации и в любом ее сечении. Для этого под X_1 и X_2 надо понимать следующие величины:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= \frac{3}{2} R_1 - \frac{1}{2} R_{\xi}; \\ X_2 &= \frac{V_2}{F_1}, \end{aligned} \right\} \quad (122)$$

где R_1 — приведенная толщина отливки произвольной конфигурации, м;

$$R_1 = V_1/F_1; \quad (123)$$

V_1 — объем отливки, м³; F_1 — площадь поверхности охлаждения отливки, м²; R_{ξ} — приведенная толщина твердой корки, м;

$$R_{\xi} = V_{\xi}/F_1; \quad (124)$$

V_{ξ} — объем затвердевшей корки, м³; V_2 — объем кокиля, м³. Таким образом, с помощью структурной диаграммы (см. рис. 51), номограммы (рис. 52) и формулы (122) находятся механические свойства чугуна в любой точке сечения отливки.

Выбор технологии по заданной структуре чугуна. На практике очень часто приходится решать задачу получения или, наоборот, устранения отбела чугуниной отливки, охлаждающейся в кокиле. Например, при литье ковкого чугуна требуется иметь полностью отбеленную отливку еще в стадии ее затвердевания. В другом случае, чтобы избежать отжига отливки перед механической обработкой, необходимо совсем не иметь отбела. Наконец, в третьем случае желательно получить твердый поверхностный слой изделия при мягкой сердцевине, для этого отливку отбеливают на заранее заданную глубину.

Во всех перечисленных случаях поставленная задача решается прежним методом с помощью структурных диаграмм рис. 12 и 51, номограммы рис. 52 и формулы (122). При этом глубина чистого отбела соответствует значению $C_{св}/C_{об} = 1$, когда весь углерод находится в связанном состоянии (белый чугун, состоящий из перлита и цементита). Глубина полного отбела включает в себя белый, а также половинчатый чугун, состоящий из перлита, цементита и графита. У половинчатого чугуна относительное количество связанного углерода изменяется от 1 до 0,2. Отсутствие отбела соответствует случаю, когда на поверхности отливки ($\xi = 0$) относительное количество связанного углерода меньше или равно 0,2.

Опыты показывают, что диаграмма, изображенная на рис. 51, может быть использована при проектировании технологии литья для широкого класса чугунов. В частности, она пригодна для обычных литейных, ковких [25, с. 107], а также синтетических и полусинтетических чугунов. Применительно к синтетическим и полусинтетическим чугунам на каунасском литейном заводе

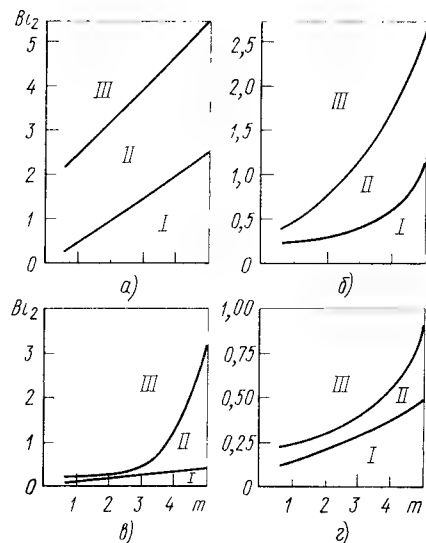


Рис. 53. Кривые для приближенного определения зон упругих (I), упруго-пластических (II) и пластических (III) деформаций рабочей поверхности плоского кокиля

«Центролит» получены обширные экспериментальные данные (Н. А. Буткевичюс, В. П. Дагис, М. В. Жельнис) [25, с. 109]. Установлено, что точнее всего структурной диаграмме следуют модифицированные синтетические чугуны.

Выбор технологии с учетом стойкости плоского кокиля. Уже отмечалось (см. гл. V), что на стойкость решающее влияние оказывают максимальные сжимающие напряжения и температуры,

возникающие в период охлаждения отливки на рабочей (внутренней) поверхности кокиля. Особенно опасны пластические деформации материала, быстро выводящие кокиль из строя. Высокие температуры способствуют повышению коррозии рабочей поверхности, росту металла и т. д.

Н. А. Буткевичюс по специально составленной программе рассчитал на ЭВМ все возможные условия охлаждения чугунной отливки в чугунном кокиле и установил в критериальной форме связи между параметрами технологического процесса и условиями работы кокиля. Полученными зависимостями можно пользоваться на практике для выбора рациональной технологии. При выборе целесообразно следить за тем, чтобы рабочая поверхность кокиля не попадала в зону пластических деформаций, а максимальные температуры рабочей поверхности $T_{2 \max}$ не превышали определенного предела.

В качестве примера на рис. 53 (Н. А. Буткевичюс, И. К. Краускас) представлены кривые, отделяющие зону I упругих от зоны II упруго-пластических и зоны III пластических деформаций плоского кокиля из серого полусинтетического чугуна марки СЧ 28—48.

Рассмотрены четыре характерных случая закрепления стенок (пластин) кокиля. В первом из них (рис. а) пластины не закреплены, они могут свободно расширяться и изгибаться — свободный кокиль, во втором (рис. б) — у пластин исключен изгиб, в третьем (рис. в) — исключено расширение, в четвертом (рис. г) — исключены изгиб и расширение.

Из рис. 53 видно, что четвертый случай самый неблагоприятный, в то время как первый допускает весьма высокие эксплуатационные нагрузки. При расчете кокиля надо стремиться не выходить за пределы зоны I. Зона III соответствует недопустимо тяжелым условиям работы кокиля. Приведенные здесь данные хорошо иллюстрируют общие соображения, высказанные на с. 67—74.

Влияние отдельных конкретных факторов на главные режимные параметры рабочей поверхности плоского чугунного кокиля, а также на время затвердевания отливки, показано на рис. 54—56 (Н. А. Буткевичюс, П. А. Рамелите). Зона допустимых упругих деформаций расположена под кривыми рис. 54. При этом в расчетах учтены переменная величина газового зазора, обусловленного короблением кокиля, а также зависимость физико-механических свойств чугуна (коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона) от температуры.

На рис. 55 и 56 кривые 1 соответствуют гипотетическому случаю, когда величина газового зазора между кокилем и отливкой в процессе ее охлаждения остается постоянной и равной нулю. Кривые 2 (второй и четвертый случаи закрепления пластин кокиля) и 3 (первый и третий случаи закрепления пластин кокиля) рассчитаны с учетом изменения со временем, вследствие коробления кокиля, величины газового зазора. Данные рис. 54—56 могут быть использованы для практических расчетов, они хорошо отражают относительную роль отдельных параметров технологии литья в кокиль. Обращает на себя внимание заметное изменение времени t_3 , а следовательно, и скорости затвердевания чугуна из-за коробления кокиля и появления газового зазора.

Выбор технологии с учетом стойкости цилиндрического кокиля. Для выбора рационального режима работы цилиндрического чугунного кокиля можно воспользоваться результатами расчетов на ЭВМ, приведенными на рис. 57 (Н. А. Буткевичюс, А. П. Барausкас, П. Ю. Матюкас). Здесь отражено влияние относительной толщины кокиля, его начальной температуры и температуры заливаемого чугуна. Из рисунка видно, что последняя температура влияет на деформацию рабочей поверхности кокиля не очень сильно.

Данные рис. 58 (Н. А. Буткевичюс, И. Б. Матюкене) позволяют избежать наиболее трудных режимов эксплуатации кокиля. Здесь сплошные кривые отделяют зону пластических деформаций (расположена над сплошными линиями) от упруго-пластических. Самые неблагоприятные условия работы кокиля соответствуют зоне пластических деформаций. Параметры выбранной рациональной технологии должны располагаться под сплошными кривыми рис. 57 и штриховыми рис. 58.

Заметим, что все кривые на рис. 52—58 рассчитаны с использованием методики изучения упругих и пластических

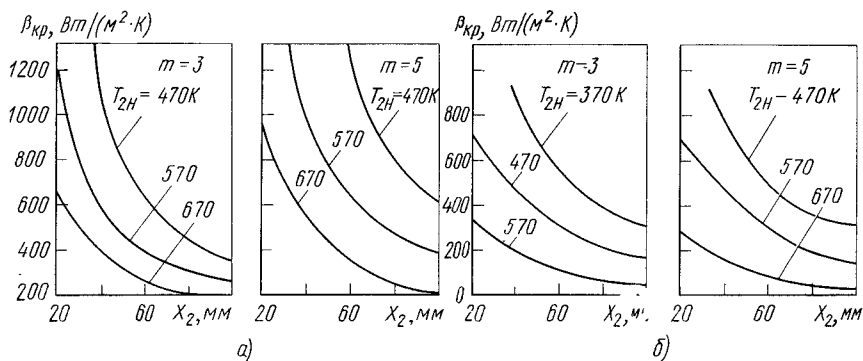


Рис. 54. Влияние толщины плоского чугуного кокиля, его начальной температуры и свойств краски на положение упругой зоны:

а — свободный кокиль; б — исключен изгиб; $m = X_2/X_1$

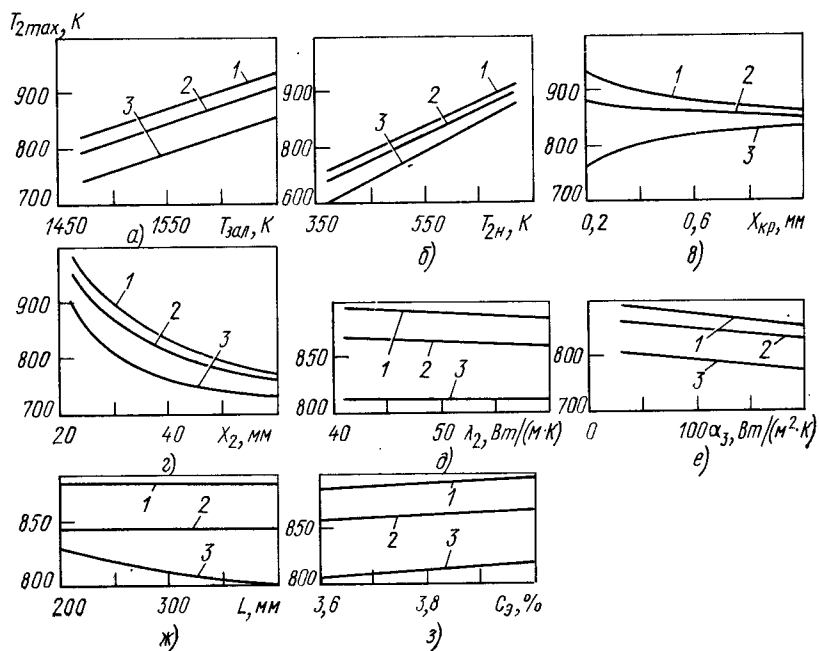
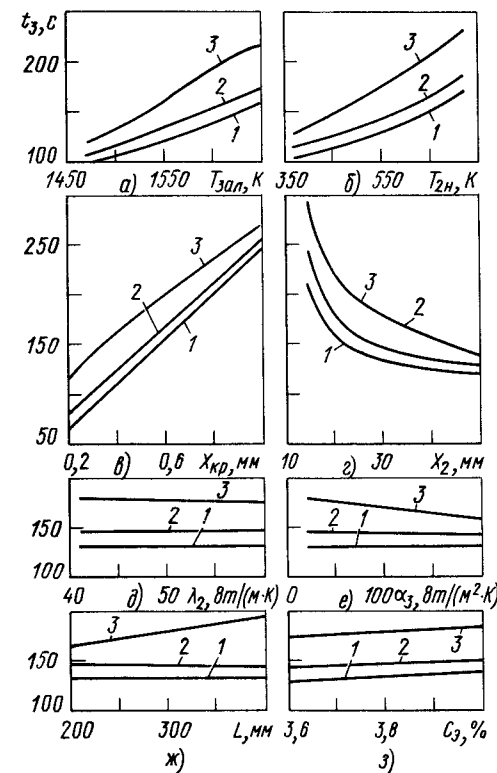


Рис. 55. Влияние температуры заливаемого металла (кривые а), начальной температуры кокиля (б), толщины слоя краски (в), теплопроводности его материала (г), коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности кокиля α_2 (е), длины и ширины стенки кокиля L (ж) и углеродного эквивалента (з) на максимальную температуру рабочей поверхности T_{max}

Рис. 56. Влияние тех же факторов (см. рис. 55) на время полного затвердевания t_3 чугуновой отливки



свойств чугунов, разработанной О. Ю. Коцюбинским. Для определения недостающих свойств — внутреннего трения и коэффициента расширения кокильных материалов при повышенных температурах — была создана специальная методика (Н. А. Буткевичус, И. И. Навасайтис, И. И. Моцкайтис). Температурные поля отливки и кокиля рассчитывались с использованием тепловой теории литья, аналитических методов П. И. Христиненко и др. Термоупругие напряжения и деформации на рабочей поверхности кокиля определялись с помощью уравнений Б. Е. Гейтвуда и В. М. Майзеля. Пластические деформации учитывались по методу переменных параметров упругости И. А. Биргера с использованием уравнений Генки.

Решение на ЭВМ двумерных задач. Реальные отливки имеют конечные размеры и часто обладают более сложной конфигурацией, чем плоская или цилиндрическая. В этих условиях иногда бывает важно учесть двумерность или трехмерность полей температур и напряжений. Строгими аналитическими методами подобные задачи не решаются, приближенные же методы иногда оказываются слишком громоздкими. Например, к числу последних относится метод сеток, или конечных разностей. Этот метод характеризуется максимальными простотой, точностью и универсальностью. В частности, он позволяет легко учесть изменение всех свойств отливки и формы с температурой, зависимость величины газового зазора от времени и т. д. Вместе с тем он отличается наибольшей громоздкостью, из-за чего редко применяется на практике. Однако быстрое действие вычислительных машин сводит на нет указанный недостаток метода сеток и в полной мере выявляет все его положительные особенности.

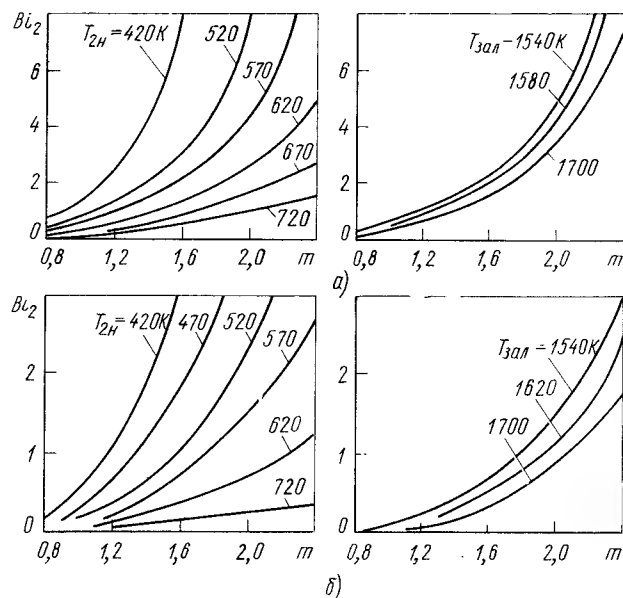


Рис. 57. Кривые для приближенного определения зон упругих (расположены под кривыми) и упруго-пластических деформаций рабочей поверхности цилиндрического кокиля: а — свободный кокиль; б — исключено осевое расширение

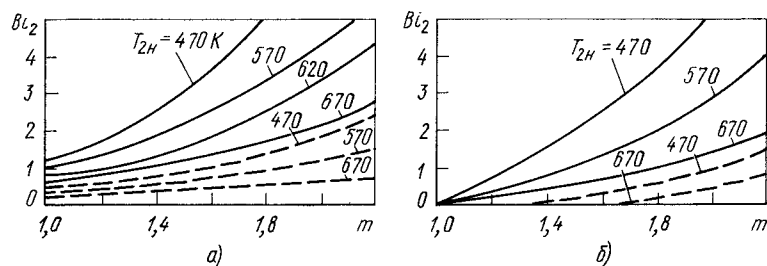


Рис. 58. Кривые для приближенного определения зон упругих (расположены под штриховыми линиями), упруго-пластических (расположены между сплошными и штриховыми линиями) и пластических (расположены над сплошными линиями) деформаций цилиндрического кокиля: а — свободный кокиль; б — исключено осевое расширение

В качестве примера на рис. 59—61 приведены результаты решения на ЭЦВМ двухмерной задачи об охлаждении отливки размером $250 \times 280 \times 42$ мм из сплава АЛ4 в стальном окрашенном ($X_{кр} = 0,3$ мм; $\lambda_{кр} = 0,21$ Вт/(м·К)) кокиле с толщиной стенки 30 мм; теплоемкость, теплопроводность и плотность материалов отливки и кокиля суть функции температуры, теплота кристаллизации

Рис. 59. Расположение изотерм в сечениях отливки и кокиля в различные моменты времени (показана четвертая часть симметричной системы)

введена в теплоемкость (Н. П. Жмакин, В. Ф. Драченев). Полученные данные позволяют судить о роли углов отливки и кокиля (рис. 59), о последовательности формирования твердой корки, что обуславливает размеры и место установки питателей и прибылей (рис. 60), а также о хорошей точности метода сеток (рис. 61).

Выбор алюминиевого анодированного кокиля. Другой пример применения метода сеток иллюстрируют кривые, изображенные на рис. 62 и 63 (Н. П. Жмакин, Р. И. Есьман). Более подробные сведения об этом методе, включая алгоритмы расчетов на ЭВМ конкретных процессов литья, можно найти в работе [56].

При литье стали и чугуна главной задачей является выбор такого теплового режима, чтобы температура внутренней поверхности кокиля под анодной пленкой не превышала 600—650 К (гл. VI). В противном случае кокиль подплавится и выйдет из строя. На рис. 62 и 63 соответствующий допустимый температурный уровень показан горизонтальной штриховой прямой.

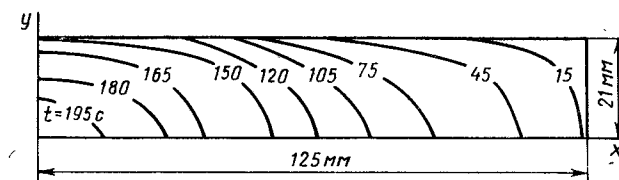
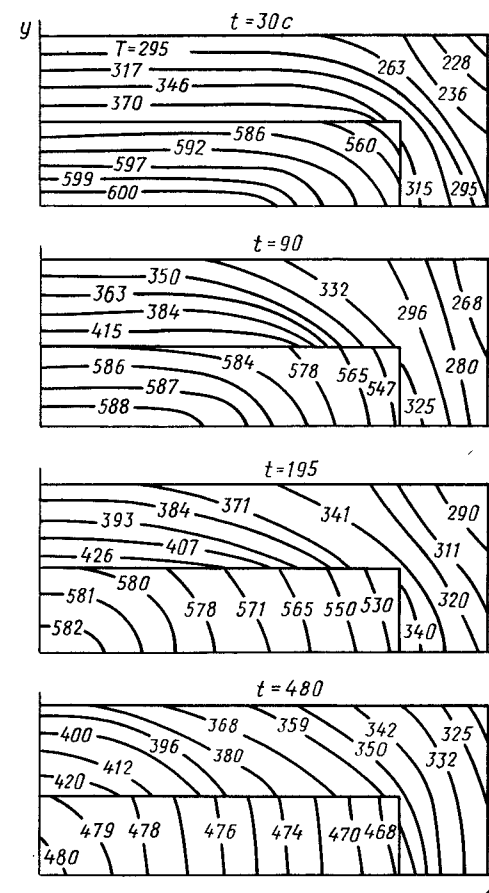


Рис. 60. Продвижение фронта солидуса в сечении отливки

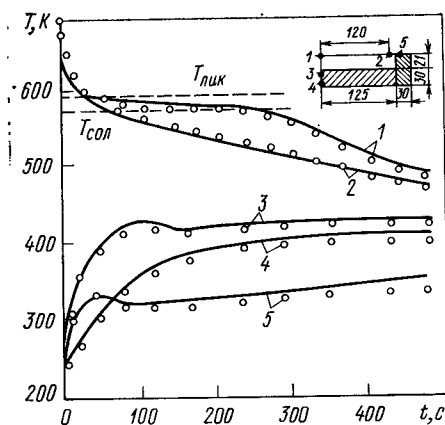


Рис. 61. Сопоставление расчетных температурных кривых с экспериментальными точками

Из рис. 62 видно, что тепловой режим литья с облицованным стальным стержнем выбран неудачно, ибо температура кокиля под анодной пленкой превышает 770 К, когда как температура солидуса сплава АЛ9 составляет 840 К [21, с. 22]. В данном случае малейшее нарушение технологии приведет к расплавлению кокиля.

В противоположность этому тепловые условия литья с песчаным стержнем (рис. 63) удовлетворяют необходимым требованиям.

Расчет теплового режима облицованного кокиля. Облицованный кокиль представляет собой многослойную систему, расчет которой весьма сложен. Поэтому при проектировании технологии целесообразно обращаться к помощи ЭВМ, которая дает возможность легко выбрать необходимые параметры рационального про-

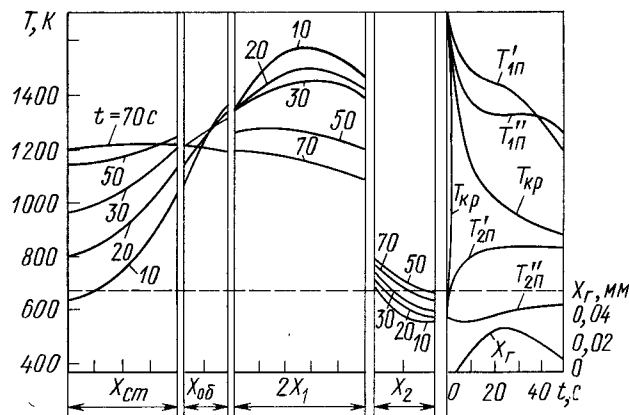
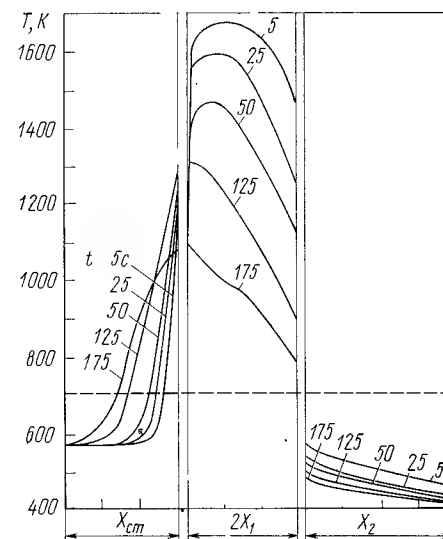


Рис. 62. Распределение температуры в полой цилиндрической чугуниевой отливке толщиной $2X_1 = 16$ мм, анодированном алюминиевом кокиле ($X_2 = 100$ мм, $X_{кр} = 0,25$ мм), центральном стальном стержне радиусом $X_{ст} = 100$ мм и облицовке стержня ($X_{об} = 5$ мм) в различные моменты времени ($T_{1п}$ — температура внутренней поверхности отливки, $T_{1п}'$ — температура наружной поверхности отливки, $T_{кр}$ — температура поверхности анодной пленки со стороны отливки, $T_{2п}$ — температура рабочей поверхности кокиля, $T_{2п}'$ — температура наружной поверхности кокиля, $X_г$ — толщина газового зазора)

Рис. 63. Распределение температуры в полой цилиндрической чугуниевой отливке ($2X_1 = 30$ мм), анодированном алюминиевом кокиле ($X_2 = 30$ мм, $X_{кр} = 0,3$ мм) и песчаном стержне (радиус $X_{ст} = 40$ мм)



цесса. Пример такого подхода приведен в виде расчетного графика на рис. 64. На нем показана зависимость линейной скорости затвердевания чугуниевой цилиндрической отливки диаметром $2X_1 = 80$ мм от радиуса x (на графике ось отливки совмещена с осью скорости u) при различных толщинах стенки кокиля и слоя облицовки (В. С. Серебро). В расчетах принято естественное охлаждение кокиля. Расчеты выполнялись по формуле (17). Для сравнения на рисунке приведена штриховая кривая, относящаяся к песчаной форме.

Данными, приведенными на рис. 64, можно пользоваться при расчетах структуры чугуна. Они характеризуют относительную роль различных параметров технологии. Расчеты показывают, что в реальных условиях на интенсивность процесса наиболее существенное влияние оказывает толщина облицовки.

Приведенные примеры традиционного применения ЭВМ весьма характерны, при этом найденные результаты представлены в такой форме, которая облегчает выбор рационального процесса на практике. Эти примеры наглядно демонстрируют большие возможности,

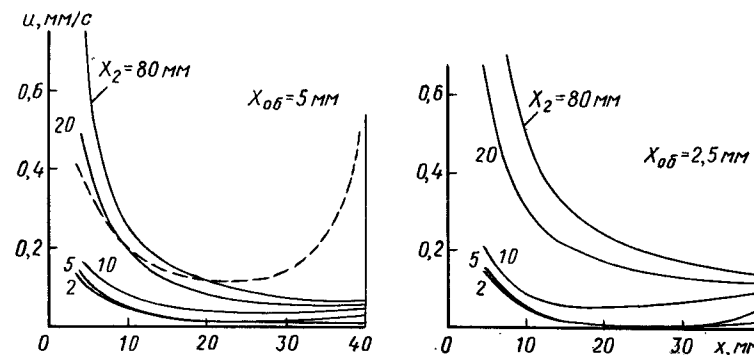


Рис. 64. Влияние различных параметров облицованного кокиля на линейную скорость затвердевания чугуна в различных сечениях цилиндрической отливки

которые заключены в использовании ЭВМ при проектировании технологии кокильного литья.

Перспективы обобщенного автоматизированного проектирования литейной технологии. Конечной целью применения ЭВМ следует считать создание систем автоматизированного проектирования оптимальной технологии изготовления отливки с наперед заданными свойствами в условиях данного конкретного завода, т. е. при наличии определенных материалов, оборудования, людского состава и организации производства. Система автоматизированного проектирования должна «уметь прочитать» чертеж отливки, перевести его на формализованный язык, проанализировать результат, выполнить все операции проектирования и выдать готовые технологические карты, чертежи оснастки и т. д. или включиться в пульт управления автоматической литейной установкой.

Для создания систем автоматизированного проектирования требуется прежде всего решить три основные проблемы. Главная из них заключается в необходимости выработать предельно универсальные критерии оценки различных вариантов технологии. Вторая проблема касается определения всех существенных для данного технологического процесса параметров и закономерных связей между ними (совокупность существенных для данного явления характеристик и функциональных связей между ними принято именовать законом, которому подчиняется данное явление). И, наконец, третья проблема связана с решением ряда специфических задач, прямо вытекающих из природы вычислительных устройств.

Термодинамическая теория качества и эффективности успешно решает первую из указанных проблем. В настоящее время многие из задач, связанных со спецификой ЭВМ, тоже в какой-то мере успешно разрешаются, а некоторые из них даже полностью решены. Например, сейчас машина вполне удачно справляется с проектированием технологии механической обработки: она «читает» чертеж изделия и т. д. и выдает чертежи необходимой оснастки (Г. К. Горанский, Минск). Что касается второй проблемы, то нам уже известно достаточно конкретных законов, характерных для литья в кокиль. Это позволяет ожидать осуществления в недалеком будущем практически приемлемых систем автоматизированного проектирования.

Вместе с тем глубокий анализ показывает, что вторая проблема, а следовательно, и задача автоматизированного проектирования в целом, может иметь также еще и другое — не традиционное конкретное, а обобщенное решение. При этом данный технологический процесс заменяется совокупностью неких универсальных, обобщенных, условных явлений, которым отвечают соответствующие обобщенные законы. Благодаря универсальности число потребных критериев и связей между ними сокращается, а общее количество фактически учитываемых конкретных характеристик технологии существенно возрастает. Это резко уменьшает число вариантов технологии, упрощает автоматизированное проектирование и расширяет возможности метода.

Уже отмечалось (см. параграф 2), что термодинамика допускает подмену сложного реального явления неким условным элементарным, если экстенсор и интенсификатор последнего выбраны по определенным правилам. Тогда условное явление можно рассчитывать с помощью уравнений термодинамики [23, с. 49, 231], [26, с. 99, 123]. Хороший пример тому — предельно универсальное условное явление качества.

Технологию литья в кокиль в первом приближении можно отобразить совокупностью следующих условных элементарных явлений: информационным (качества), агрегатным, гидродинамическим, метрическим, химическим, механическим и поверхностным [32, с. 21]. Условное элементарное агрегатное явление охватывает комплекс вопросов, связанных с выплавкой металла для отливки. Это может быть либо простое изменение агрегатного состояния в плавильной печи, либо более сложный процесс получения расплава в вагранке. Условное гидродинамическое явление характеризует транспортировку жидкого металла

и заполнение им формы. Метрическое явление ответственно за формирование размеров, конфигурации, усадочных дефектов — раковин, пористости — и т. д., в его основе лежит процесс затвердевания металла. Химическое явление описывает процесс кристаллизации, при этом образуется необходимая структура. Механическое явление характеризует процесс формирования всевозможных механических свойств: твердости, прочности, пластичности, упругости и т. п. Наконец, условное поверхностное явление определяет свойства поверхности отливки: чистоту, сплошность, наличие пригара и т. д. В качестве условного экстенсора во всех перечисленных явлениях может быть выбрана масса или объем. К этим условным явлениям должны быть добавлены также истинно элементарные явления: термическое, диффузионное, электрическое и т. д.

Метод подмены уже оправдал себя во многих весьма сложных ситуациях. Примером является решение проблемы качества и эффективности. Другой пример связан с успешным выбором на ЭВМ составов красителей для тканей [23, с. 364]. Расчет основан на использовании условной элементарной зрительной формы явления, при этом отпадает надобность углубляться в тонкости зрительных восприятий. Интересно описанным методом была решена и задача определения на ЭВМ прироста биомассы лесных насаждений. При этом в качестве условных обобщенных экстенсоров были выбраны энергия, биомасса, а также массы воздуха, воды, почвы и грунта. Этих экстенсоров оказалось вполне достаточно, чтобы учесть влияние на прирост биомассы огромного числа реальных факторов. Приведенные примеры свидетельствуют о большой перспективности метода обобщенного проектирования с помощью ЭВМ.

Как видим, термодинамический подход, изложенный в настоящей главе, обладает многими важными преимуществами, которые являются закономерным следствием принятия новой парадигмы теории [32, с. 7], [85].

Раздел второй

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

Глава VIII

ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОТЛИВОК И КОКИЛЕЙ

1. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОТЛИВОК

Общие требования к отливкам, получаемым в кокилях, такие же, как и при других способах литья [131]. Существо этих требований сводится к тому, чтобы отливки имели:

наиболее простое внешнее очертание — без резких углов, поворотов, высоких ребер, выступов и глубоких отверстий (карманов);

уклоны, обеспечивающие легкое извлечение отливки из формы или металлического стержня из отливки;

стенки оптимальной толщины, удовлетворяющие условиям заливки и питания;

такое сочетание конструктивных элементов, при котором соблюдается принцип направленности затвердевания и уменьшается торможение усадки.

Чем полнее конструкция удовлетворяет перечисленным требованиям, тем она технологичнее. Существуют различные способы количественной оценки технологичности. Один из них заключается в определении коэффициента габаритности, $\text{дм}^3/\text{кг}$:

$$K_V = \frac{V_{\text{габ}}}{M_1}, \quad (125)$$

где $V_{\text{габ}}$ — габаритный объем отливки; M_1 — масса отливки. Чем меньше K_V , тем технологичнее конструкция. Для оценки технологичности тонкостенной отливки предложено неравенство [107]

$$200 \frac{R_{\text{пр}}}{L} \geq 1, \quad (126)$$

где $R_{\text{пр}}$ — приведенная толщина; L — наибольший размер отливки.

Выражения (125) и (126) позволяют проводить сравнительный анализ технологичности различных вариантов конструкций литых деталей.

Конструктивные элементы деталей. Минимальные толщины стенок δ_1 отливок, получаемых в кокилях, рекомендуется принимать по табл. 14.

Большие значения δ_1 чугуновых отливок относятся к чугуну с шаровидным графитом. Величины δ_1 алюминиевых деталей зависят от марки сплава (табл. 15).

Таблица 14

Минимальная толщина стенок
отливок

Сплавы	Площадь поверхности стенок, см^2	Минимальная толщина стенок, мм
Чугун	< 25	4—5
»	25—125	6—7
Сталь кислая	25—125	8
Магниеые	< 30	3
Бронза	< 30	4—6

Таблица 15

Минимальная толщина (мм) стенок
отливок из алюминиевых сплавов

Площадь поверхности стенок, см^2	АЛ2	АЛ9, АЛ11	АЛ8, АЛ13
100—250	2,2	3,0	4,0
250—900	2,5	3,5	4,5
Свыше 900	3,5	4,0	5,0

Толщины внутренних стенок и ребер жесткости принимают равными $0,7\delta_1$. Плавность перехода от одного элемента к другому обеспечивается, если $\frac{\delta'_1}{\delta''_1} \geq 0,8$ (где δ'_1 и δ''_1 — толщины сопрягаемых стенок), а переход осуществляется на участке длиной

$$l \geq (4 \div 5)(\delta''_1 - \delta'_1).$$

Радиусы скруглений при угловом сопряжении стенок принимают

$$R = \frac{\delta'_1 + \delta''_1}{2},$$

но для чугуна — не менее 3 мм. Для уменьшения внутренних напряжений в отливках из высокопрочного чугуна радиус скругления равностенного крестообразного сочленения не должен превышать толщину стенки. В случае разностенного крестообразного сочленения R должен быть не более толщины тонкой стенки [145].

Рекомендуемые уклоны стенок отливок из различных сплавов приведены в табл. 16.

Металлические стержни и болваны можно применять, если диаметр отверстия составляет не менее 40 мм при литье чугуна и 5 мм при литье алюминиевых и магниевых сплавов. Глубина отверстия в первом случае не должна превышать половины диаметра.

Предельные значения длин отверстий в отливках из алюминиевых и магниевых сплавов:

Диаметр отверстия, мм	До 6	6—12	12—25
Длина отверстия, мм	24	36—73	96—200

Таблица 16

Уклоны стенок при литье в кокиль

Сплавы	Уклон в % от высоты стенки отливки		
	Наружная поверхность отливки	Внутренняя поверхность (со стороны металлического стержня) при высоте стенки, мм	
		до 50	свыше 50
Чугун при высоте стенки, мм:			
до 50	4,0—7,0	—	—
51—100	2,0—5,0	—	—
101—500	1,0—3,0	—	—
Углеродистая сталь	5,0	—	—
Алюминиевые	1,0—1,5	5,0	2,0—2,5 *
Магниеые	2,5	3,0	2,0—3,0
Медные	1,5	7,0	3,0—3,5 *

* Для тонкостенных отливок.

Точность размеров, припуски на механическую обработку и качество поверхности. Допускаемые отклонения на размеры отливок из чугунов с пластинчатым и шаровидным графитом не должны превышать величин, соответствующих II классу точности по ГОСТ 1855—55.

Допускаемые отклонения при литье в кокиль цветных сплавов зависят от сложности отливки: чем проще конструкция отливки, тем выше точность. К простым относятся конструкции, не имеющие поверхностей теоретического контура, для которых требуется не более двух отъемных частей и вставок в кокилях и не более трех стержней. Точность повышается при замене обычных песчаных стержней оболочковыми и металлическими.

Наименьший припуск на механическую обработку литых деталей должен быть больше допуска на соответствующий размер. При литье в кокиль чугуна припуски принимают по II классу ГОСТ 1855—55, а при литье цветных сплавов — согласно табл. 17.

Гладкость поверхности отливок, изготовленных в кокилях, характеризуется высотой микронеровностей в пределах 20—40 мкм.

Особенности конструкции отливок, полученных в облицованных кокилях. Отечественный и зарубежный опыт литья в облицованные кокили показывает, что для данного процесса в принципе справедливы те же требования к конструкции отливок, что и при обычных способах литья. Однако преимущества облицованных кокилей используются наиболее полно, когда применение песчаных

Таблица 17

Наименьшие припуски (на одну сторону), мм, на механическую обработку отливок из цветных сплавов

Наибольший габаритный размер отливки, мм	Классы точности		
	1—3	4,5	6,7
До 60	0,5	2,0	2,5
60—100	0,5	2,0	3,0
100—160	0,5	2,5	3,5
160—250	0,7	2,5	4,0
250—400	1,0	2,5	4,0
400—630	1,5	3,0	5,0
630—1000	—	3,0	5,5
1000—1250	—	4,0	6,0
1250—1600	—	4,0	6,5

стержней ограничено и большая часть отливки образуется кокилем. Важно подчеркнуть, что в облицованных кокилях широко используют болваны.

Точность отливок, получаемых в облицованных кокилях, выше, как правило, чем в песчаных формах. Вследствие этого припуски на механическую обработку могут быть уменьшены в 1,5—2,0 раза. Более подробные сведения по данному вопросу, как и примеры деталей, получаемых в облицованных кокилях, приведены в гл. XVIII.

В последние годы заметно расширена номенклатура чугуновых отливок, получаемых в обычных кокилях. Освоены процессы литья в кокиль чугуна с шаровидным графитом и деталей относительно сложной конфигурации. К числу таких отливок относятся:

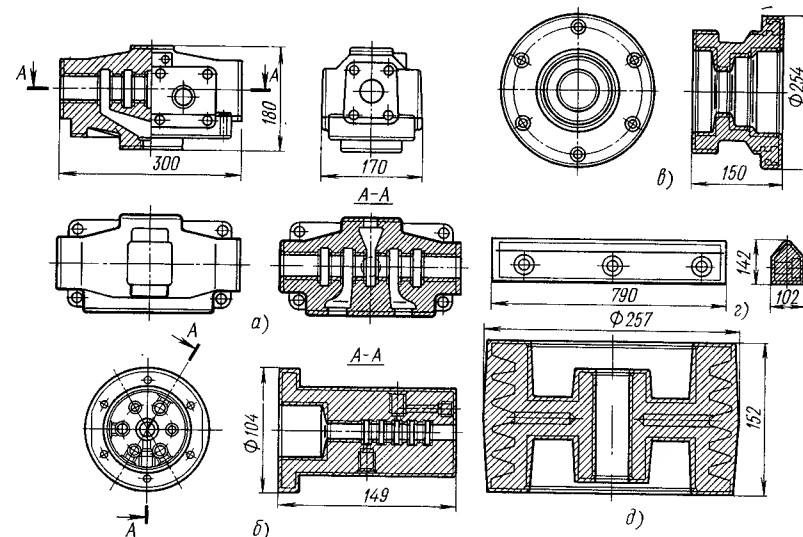


Рис. 65. Эскизы чугунных отливок:

а — корпус ($\frac{40}{55}$); б — корпус ($\frac{3,6}{4,2}$); в — ступица ($\frac{19,5}{26,6}$); г — направляющая ($\frac{59,3}{67}$); д — шкив ($\frac{26}{41}$). В скобках указана масса в кг; в числителе — детали, в знаменателе — отливки

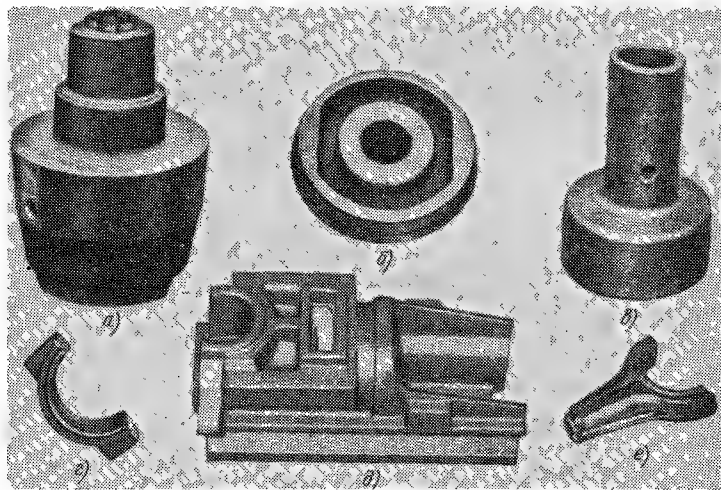


Рис. 66. Отливки из чугуна с шаровидным графитом:

а — подушка молота (450); б — ступица муфты тормоза (27); в — поршень молота (45); г — крышка шатуна (12); д — ползун (78); е — шатун (18). В скобках указана масса отливок в кг. Разработки НИИСЛ

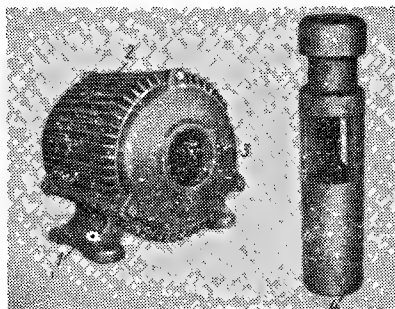


Рис. 67. Отливки из серого чугуна:

1 — лапа (1,7); 2 — станина электродвигателя (30); 3 — щит подшипниковый (3,6); 4 — кран (33). В скобках указана масса отливок в кг. Разработки НИИСЛ

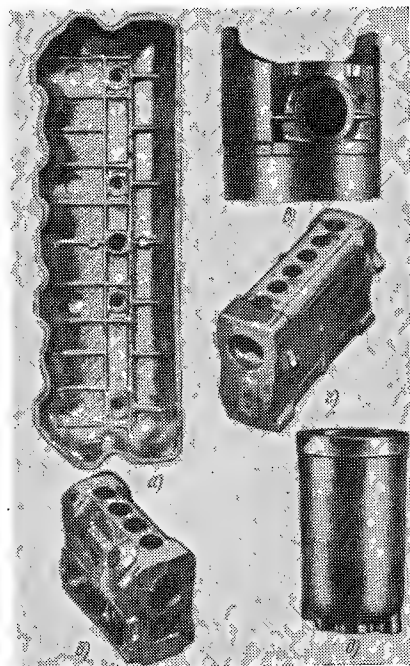


Рис. 68. Алюминиевые отливки:

а — крышка блока цилиндра тракторного двигателя; б, в — корпуса топливного насоса дизельного двигателя; г — поршень двигателя; д — корпус фильтра тракторного двигателя

щиты, лапы и ребристые станины электродвигателей, тормозные барабаны, корпуса гидродвигателей и гидрораспределителей, ступицы автомобильных прицепов и шестерен, башмаки и стойки плугов, детали сантехнической и электротехнической арматуры, посуда, кронштейны, рычаги, втулки, шкивы, крышки подшипников, шатуны, направляющие планки и многие другие. Конструкции некоторых чугунных отливок показаны на рис. 65 [145]. На рис. 66 и 67 представлены некоторые литые детали.

Кокильное литье нашло наиболее широкое применение при производстве деталей из цветных сплавов и, в частности, на основе алюминия. В последнем случае масса отливок колеблется в весьма широких пределах (0,2—50 кг). Нередко получают алюминиевые детали массой свыше 100 кг и даже 350 кг. Это обычно крупногабаритные (размером до 1500 мм) корпусные конструкции (рис. 68).

Дополнительные примеры получения в кокилях отливок из черных и цветных сплавов приводятся в следующем разделе книги, где рассматриваются особенности литья конкретных сплавов.

2. ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ КОКИЛЕЙ

Разновидности кокилей. В табл. 18 сведены многочисленные разновидности кокилей с тонкослойным покрытием. Плоские кокили имеют рабочее гнездо глубиной значительно меньшей, чем его ширина и длина. В цилиндрических кокилях глубина рабочего гнезда значительно больше, чем его ширина и длина. Остальные признаки разделения кокилей являются вполне очевидными. Некоторые виды кокилей: составные, в том числе из неунифицированных и унифицированных элементов, двухслойные и из композитных (металлокерамических) материалов, — являются специальными. Вследствие особых свойств этих форм им посвящена специальная глава X. Примеры кокилей различных конструкций приведены на рис. 69—72. Вопросы конструирования облицованных кокилей рассматриваются в гл. XVIII. Методы проектирования качества кокилей обсуждаются в гл. VII.

Толщина рабочей стенки. Практика показывает, что центральным вопросом проектирования кокилей является выбор толщины и материала их рабочих стенок. Эти параметры конструкции определяют долговечность формы — стойкость против трещин и коробления. Рассмотрим наиболее распространенные методы выбора оптимальной толщины стенки кокиля X_2 .

А. И. Вейник рекомендует для расчетов толщин стенок плоских кокилей формулу [16]

$$X_2 = \frac{k}{2} A \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8}{A} \frac{\lambda_2}{\alpha_1}} \right), \quad (127)$$

Таблица 18

Разновидности кокилей

Признак разделения	Разновидности кокилей
Отношение глубины рабочего гнезда к среднему габаритному размеру в поверхности разъема Расположение в пространстве поверхности разъема	1. Плоские 2. Цилиндрические 1. Неразъемные (вытряхные) 2. С горизонтальной плоскостью разъема 3. С вертикальной плоскостью разъема 4. С комбинированной поверхностью разъема
Число рабочих гнезд	1. Одноместные 2. Многоместные
Конструктивное исполнение рабочей стенки	1. Цельные 2. Составные: а) из неунифицированных элементов б) из унифицированных элементов (параллелепипедов, иголок и др.)
Способ охлаждения	1. С воздушным охлаждением (естественным и принудительным) 2. С жидкостным охлаждением (водяным, масляным и др.) 3. С комбинированным охлаждением (водовоздушным, чередующимся водяным и воздушным и т. п.)
Способ подвода охлаждающей среды к рабочей стенке Материал рабочей стенки	1. Однослойные 2. Двухслойные 1. Чугунные 2. Стальные 3. Алюминиевые 4. Медные 5. Из специальных сплавов и композитных материалов
Долговечность теплозащитного покрытия	1. С периодически наносимым теплозащитным покрытием 2. С постоянным теплозащитным покрытием (чугунные и стальные с плазменным напылением, алюминиевые с анодированной поверхностью)

где k коэффициент; $A = \frac{3Q_1}{c_2 \rho_2 (T_{кр} - T_{2н})}$;

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_{кр}}{X_{кр}}; Q_1 = X_1 \rho_1 [c_1 (T_{зал} - T_{кр}) + r_1];$$

X_1 — половина толщины стенки плоской отливки; c — удельная теплоемкость (индекс «1» относится к отливке, «2» — к кокилю; штрих сверху — к жидкому состоянию); ρ — плотность; r — теплота затвердевания; $T_{зал}$ и $T_{кр}$ — температуры заливки и

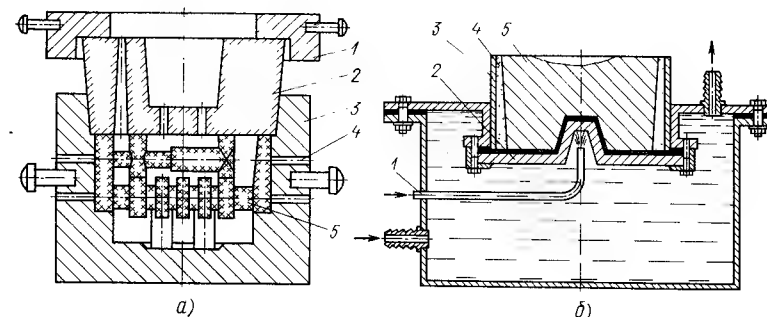


Рис. 69. Схемы вытряхных кокилей:

а — чугунный: 1 — груз; 2 — песчаная чаша; 3 — кокиль; 4 — вентиляционный канал; 5 — песчаный стержень; б — алюминиевый с водяным охлаждением: 1 — трубка подвода воды; 2 — алюминиевый кокиль; 3 — стальная гильза; 4 — стержень; 5 — отливка

Рис. 70. Схема кокиля с горизонтальной плоскостью разъема:

1 — литниковая чаша; 2 — крышка кокиля; 3 — стержень; 4 — корпус кокиля

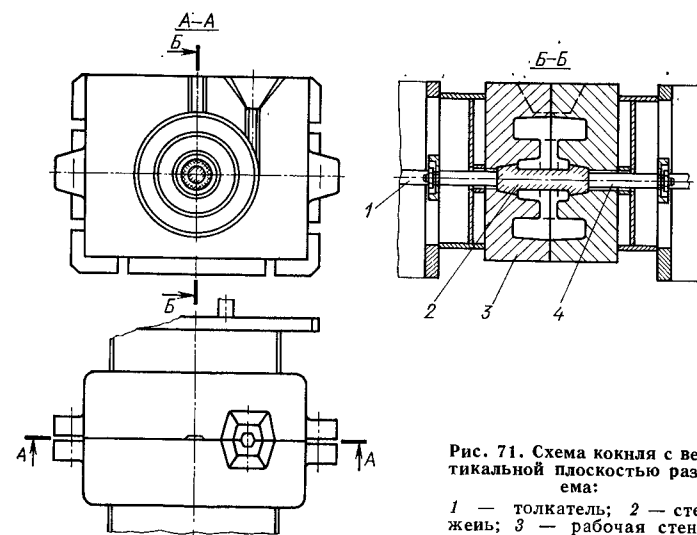
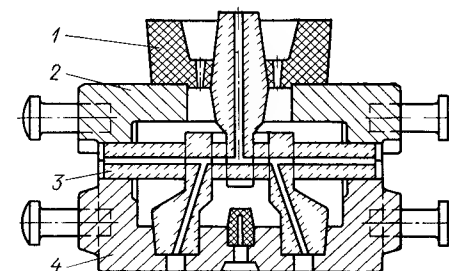


Рис. 71. Схема кокиля с вертикальной плоскостью разъема:

1 — толкатель; 2 — стержень; 3 — рабочая стенка; 4 — выталкиватель

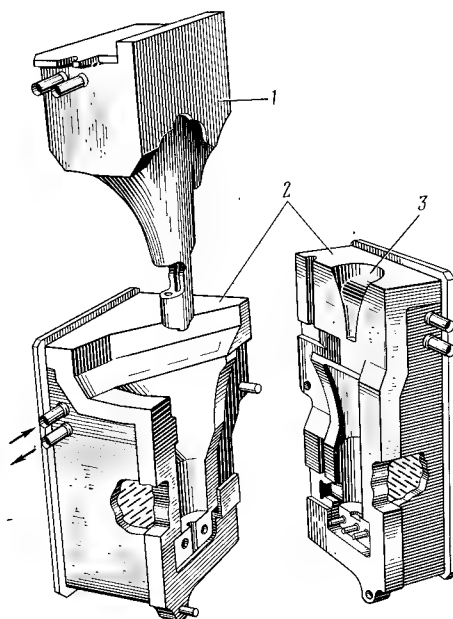


Рис. 72. Схема водоохлаждаемого кокиля с комбинированной поверхностью разъема:

1 — стержень; 2 — кокиль; 3 — заливочная воронка. Стрелками показаны трубки подвода и отвода воды

кристаллизации соответственно; λ — коэффициент теплопроводности; $X_{кр}$ — толщина слоя краски (покрытия). При выводе формулы (127) принято, что толщина стенки кокиля X_2 должна равняться глубине прогрева формы к моменту окончания затвердевания отливки. При большей величине X_2 термические условия формирования отливки не изменяются. Правочный коэффициент k выбирают по конструктивным соображениям. В пер-

вом приближении можно принять $k = 1$. Экспериментальная проверка метода в лабораторных и заводских условиях осуществлена Н. Д. Орловым.

А. М. Петриченко для выбора X_2 получил выражение [107]

$$X_2 = \frac{3B}{2K_p} X_1 \left(K_v + \frac{1 + K_v}{T_{зал} - T_{2н}} \frac{r_1}{c_1} \right), \quad (128)$$

где B — коэффициент, учитывающий склонность кокиля к короблению, а его материала — к окислению ($B = 1,25 \div 2,0$); X_1 — половина толщины стенки отливки (или радиус цилиндрической и сферической стенок);

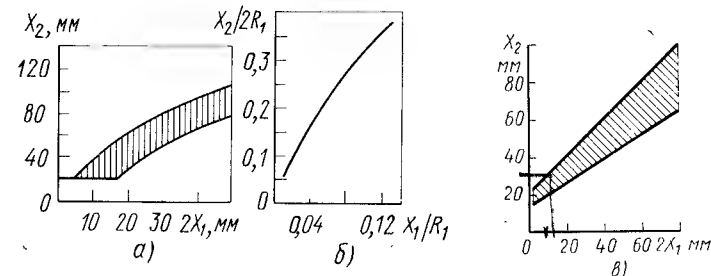
$$K_p = \frac{2X_1}{R_{пр}}, \quad K_v = \frac{b_2}{b_1};$$

$R_{пр}$ — приведенная толщина стенки отливки; b_1 и b_2 — коэффициенты аккумуляции теплоты для материала отливки и формы соответственно; $T_{зал}$ и $T_{2н}$ — температура металла в момент заливки и начальная температура кокиля; r_1 и c_1 — удельная теплота затвердевания и удельная теплоемкость материала отливки.

По опыту литья чугунных деталей на московском заводе «Водоприбор» предложена зависимость

$$X_2 = 11 \sqrt{2X_1}.$$

В. С. Серебро на основании теоретического анализа напряженно-деформированного состояния рабочих стенок кокилей различных конструкций для выбора X_2 рекомендует графики а и б.



Толщина стенок плоских кокилей (график а) принимается в границах заштрихованной области ближе, как правило, к верхнему пределу. Для отливок сложной конфигурации, имеющих близко расположенные выступы, — по нижнему пределу. Для стенок отливок, оформляемых с одной стороны песчаным стержнем, X_2 определяется по удвоенной толщине стенки отливки.

Величина X_2 для цилиндрических кокилей (график б) полых отливок принимается по величине критерия X_1/R_1 , где X_1 — половина толщины стенки полых отливок; R_1 — наружный радиус отливки. Для сплошных цилиндрических отливок $X_2 = 1,4R_1$.

Если конструкция цилиндрического кокиля исключает возможность его термического расширения вдоль оси, то X_2 принимается как для плоской формы, т. е. по графику а.

Необходимо подчеркнуть, что рассмотренный метод прошел длительную производственную проверку. Полученные при этом положительные результаты послужили основанием для включения метода в ГОСТ 21093—75.

Согласно ГОСТ 16237—70 значение X_2 находится с помощью графика в. Для стальных рабочих стенок и стенок из высокопрочного чугуна величина X_2 принимается ближе к нижней границе заштрихованной области.

Материал рабочей стенки. Для относительной оценки пригодности материалов рабочих стенок кокилей предложены различные методы. Основные из них приведены в табл. 19. Чем больше значения параметров, тем выше, при прочих равных условиях, стойкость кокилей. Рекомендуемые для рабочих стенок марки материалов сведены в табл. 20. Кокили из высокопрочного чугуна имеют обычно более высокую стойкость, чем из серого чугуна. Благоприятное влияние на стойкость оказывают пониженное содержание серы в сером чугуне и углерода в сталях. В сплаве АЛ9 содержание магния рекомендуется доводить до 0,6—0,8%,

Таблица 19

Методы относительной оценки пригодности материалов для рабочих стенок кокилей

Автор	Параметр оценки	Область приложения метода
О. Ю. Коцюбинский и Ю. Кадлец	$Z_0 = \frac{\sigma_B \lambda}{\alpha_T E},$ где σ_B — предел прочности при растяжении; λ — теплопроводность; α_T — коэффициент термического расширения; E — модуль упругости	Хрупкие материалы, кокиль имеет теплозащитное покрытие
А. И. Храмченков	$K = \frac{\lambda \delta}{\alpha_T E},$ где δ — относительное удлинение; $K' = \frac{\lambda a_n}{\alpha_T E},$ где a_n — ударная вязкость	Пластичные материалы
В. С. Серебро	$Z'_0 = \frac{\sigma_B}{\alpha_T E}$	Хрупкие материалы, кокиль не имеет теплозащитного покрытия
В. С. Серебро	$P = \frac{a_n}{\sigma_T \left(\alpha_T \theta_k - \frac{2\sigma_T}{E} \right)},$ где σ_T — предел текучести; $\theta_k = \theta_{зал} \frac{b_1}{b_1 + b_2},$ $\theta_{зал}$ — температура металла в момент заливки, отсчитанная от начальной температуры кокиля как от нуля; b_1 и b_2 — коэффициенты аккумуляции теплоты материалов отливки и кокиля соответственно	Пластичные материалы. Примечание: для стальных стенок в формулу подставляют значения a_n при температурах 770—820 К

Таблица 20

Материалы для рабочих стенок кокилей

Материал	Основное назначение
СЧ 18—36, СЧ 21—40	Кокили для мелких и средних отливок: с воздушным либо водовоздушным охлаждением, а также в двухслойном исполнении
ВЧ 42—12, ВЧ 45—5	Кокили для средних и крупных отливок: с воздушным либо водовоздушным охлаждением, а также в двухслойном исполнении
Сталь 15Л-II, 15ХМЛ, 10, 20, СтЗ	Кокили с жидкостным охлаждением, вкладыши двухслойных кокилей
АЛ9, АЛ11	Водоохлаждаемые кокили с анодированной поверхностью, кокили с естественным охлаждением и анодированной поверхностью (в основном для мелких отливок)
Медь и ее сплавы, легированные стали, сплавы с особыми свойствами	Вставки в места интенсивного термогидродинамического износа, металлические стержни

что позволяет достигать при анодировании окисных пленок повышенной толщины [25]. Технология анодирования алюминия описана в гл. VI.

Существование многих методов оценки пригодности материалов для кокилей объясняется различиями в механизмах разрушения хрупких и пластичных материалов, а также особенностями напряженно-деформированного состояния рабочих стенок без покрытия и с покрытием. Что же касается параметров K (K') и P , при их выводе проявилось различие в представлениях о природе разрушения тела в условиях знакопеременной пластической деформации.

Вывод параметра P основан на наиболее строгих физических предпосылках: данный параметр представляет собой отношение работы разрушения, выраженной величиной a_n , к работе пластической деформации за один цикл нагружения кокиля.

Необходимость подстановки в формулу для определения P значений a_n при 770—820 К объясняется тем, что при этих температурах происходит локальное снижение вязкости стали.

Прочие элементы кокилей. Основные размеры немеханизированных вытряхных и створчатых (с книжным вертикальным раз-

емом) кокилей определены ГОСТ 16234—70 и ГОСТ 16235—70; механизированных с воздушным охлаждением — ГОСТ 16236—70. Вспомогательные конструктивные элементы кокилей — ребра жесткости, охлаждающие штыри, зазоры между направляющими металлических стержней и кокилей, шероховатость поверхности, ручки, колонки, рукоятки, выталкиватели, приспособления для выталкивания отливок и стержней, направляющие штыри, фиксаторы, каналы и пробки вентиляционные — регламентированы ГОСТ 16237—70 — ГОСТ 16261—70. Технические требования к кокилям оговорены ГОСТ 16262—70.

Выталкиватели, колонки и направляющие втулки кокилей с жидкостным охлаждением определены ГОСТ 21088—75 — ГОСТ 21092—75.

Особенности конструирования кокилей с жидкостным охлаждением. В качестве охлаждающей среды стальных кокилей применяют воду и машинное масло. Системы водяного охлаждения проще в изготовлении и обслуживании, более безопасны в пожарном отношении, позволяют обеспечить наиболее высокую частоту заливок. Однако при охлаждении водой имеется опасность ее попадания внутрь кокиля; трудно обеспечить начальную температуру кокиля (обычно однослойного) выше 420 К; затруднен нагрев кокиля перед первой заливкой (после длительного перерыва между очередными заливками).

В качестве охлаждающей среды алюминиевых кокилей используют воду. Водяное охлаждение в сочетании с теплозащитным покрытием стенки в виде пленки окислов обеспечивает температуру внутренней поверхности алюминиевой стенки не выше 570—620 К, что является необходимым по условиям ее нормальной эксплуатации. При этом должен быть использован наиболее интенсивный режим теплообмена, который возникает при ядерном режиме кипения воды [21, 25].

При водяном охлаждении температура внешней поверхности стенки кокиля перед заливкой не может быть выше 373 К (100°С), так как после прекращения подачи воды охлаждение кокиля продолжается за счет кипения воды, находящейся в полости охлаждения. Во избежание переохлаждения кокиля температура воды в полости охлаждения должна быть близкой к температуре кипения и подача воды в полость должна прекращаться сразу же после отвода теплоты, отдаваемой отливкой, это достигается способом подвода воды. Вода подводится к верхней части полости охлаждения кокиля. Подводящий патрубок в формах для деталей массой до 30 кг изготавливают из трубы сечением 1/2". Отводящий патрубок также располагается в верхней части полости охлаждения; сечение его должно быть больше подводящего (для отливки массой до 30 кг отводящий патрубок выполняют обычно из трубы сечением 3/4").

Если рабочая стенка кокиля имеет выступающие части, то в ней образуются со стороны полости охлаждения глубокие карманы. Чтобы предотвратить образование паровых подушек, воду подводят непосредственно к этим карманам (см. рис. 69, б). Воду подают в полость охлаждения кокиля обычно столько времени, сколько отливка находится в форме. Подачу воды следует начинать в тот момент, когда фронт прогрева достигает охлаждаемой поверхности кокиля. Водяное охлаждение двухслойных кокилей значительно проще: вода непрерывно протекает через полость корпуса; при этом вода подводится снизу и отводится сверху.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОКИЛЕЙ

1. ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОКИЛЕЙ

Проблема изготовления кокиля — это прежде всего проблема изготовления его рабочей стенки (или металлического стержня). Получение остальных, по существу, вспомогательных элементов кокиля — для спаривания частей кокиля, выталкивания отливок, охлаждения (нагрева) и т. д. (см. гл. VIII) — относится к общим вопросам производства оснастки и поэтому здесь не рассматривается. Здесь также не рассматривается изготовление кокилей специальных видов. Такие кокили рассмотрены в отдельной главе X. В настоящей главе приводятся только дополнительные данные о постоянных (в том условном смысле, который оговорен в гл. VI) покрытиях, формируемых на рабочих стенках непосредственно при их изготовлении. Другие разновидности постоянных покрытий рассматривались ранее (см. параграф 5 гл. VI).

Проблему изготовления рабочей стенки кокиля следует рассматривать с двух точек зрения: получения формообразующей полости при минимизации затрат труда и материала и обеспечения наиболее высокой стойкости.

Рабочие стенки изготавливают литьем, механической и электрофизической обработкой, сваркой, штамповкой и комбинацией этих способов. Наиболее широкое распространение получило литье (многие его разновидности) с последующей доводкой грабюры формы резанием и слесарной обработкой, причем стремятся к минимальному объему доводочных операций.

Выбор способа изготовления рабочей полости кокиля зависит от многих факторов: норм точности, габаритных размеров и конфигурации отливки, материала рабочей стенки, способа ее охлаждения и производственных возможностей. При выборе способа приходится также иметь в виду его влияние на стойкость.

По мнению многих специалистов, кокили с литыми рабочими гнездами более долговечны. В работе [114] описан опыт получения в керамической форме металлического стержня с литой рабочей поверхностью. Отмечается его повышенная стойкость. По другим данным чугунные кокили с литой поверхностью показали стойкость в 5 раз выше, чем кокили, обработанные режущим инструментом [104]. Влияние следов режущего инструмента на образование сетки разгара отмечалось ранее (см. гл. V).

При выборе способа финишной обработки рабочей стенки необходимо учитывать также влияние шероховатости формы на усилие извлечения отливки (или стержня). Обработка резанием всегда неизбежна, когда нужно получить в отливке тонкие и глубокие полости (например, межреберные пространства). Однако в некоторых случаях чистота поверхности стержня может быть

не очень высокой. Так, по данным В. А. Комиссарова, при литье чугуна шероховатость поверхности окрашиваемых стержней может находиться в пределах 2—3 классов или даже быть литой.

Способы литья. Заготовки кокилей в большинстве случаев отливают по специально изготовленным моделям. Для получения рабочих гнезд повышенной чистоты поверхности и точности применяют стержневые ящики. Заготовки оказываются более точными, если твердение формы и стержня происходит в контакте с оснасткой. Однако применяют и обычные песчаные формы, например изготовленные прессованием под высоким давлением [104].

Формы и стержни, как правило, тщательно окрашивают или натирают противопригарными пастами. Выбор противопригарных средств зависит от материала кокиля. При литье чугуна без каких-либо покрытий можно применять стержни на мелком кварцевом (зернистостью не более 016) песке и фенолформальдегидным связующем (например, ПК-104). Наиболее гладкую и чистую поверхность дают стержни на цирконовом концентрате.

Для получения стальных рабочих стенок хорошо зарекомендовал себя CO_2 — процесс, при котором могут быть получены заготовки, не требующие последующей обработки резанием формообразующей поверхности. Именно этим процессом получают заготовки кокиля и стержня для производства отливок стоек плугов (см. рис. 72).

Применяемая при этом формовочная смесь имеет следующий состав (% по массе): 0,5 15%-ного раствора едкого натра; 5,5 жидкого стекла (плотность 1400—1510 кг/м³, модуль 2,4—2,7); остальное — кварцевый песок К020Б. Приготовление смеси: в бегуны загружают песок и раствор едкого натра, после 3—4 мин перемешивания вливают жидкое стекло, и перемешивание продолжается еще 7—8 мин. Газопроницаемость сырых образцов — не менее 190 ед.; предел прочности при растяжении после продувки в течение 1 мин — не менее 1,8 кгс/см², влажность 2,5—2,8%.

Описанная технология получения стенок кокилей отработана в НИИСЛе. Возможность получения с ее помощью отливок без последующей обработки резанием отмечается также в работе [105].

Кроме CO_2 -процесса для получения стальных кокилей — применяют керамические формы (стержни). Литье в керамические формы используют и при производстве чугунных стенок. По некоторым данным, при такой технологии литья объем обработки резанием сокращается на 50—60%. В ряде публикаций отмечается высокая точность чугунных отливок, которые получены в кокилях, изготовленных по керамическим стержням [89, 95].

Для изготовления алюминиевых кокилей рекомендуется способ литья в стальные и чугунные мастер-кокили. Аналогичный процесс применяют в отдельных случаях при производстве чу-

гунных кокилей для неотчетственных отливок в условиях единичного производства. Речь идет о способе налива чугуна на отливку, для производства которой кокиль предназначен. В данном случае к отливке приделывают знаки (при необходимости). Изготовленные таким образом кокили отличаются невысокой точностью рабочего гнезда. Размеры рабочего гнезда закономерно уменьшены (если при последующей термической обработке не произошел рост металла).

При получении заготовок по схеме кокиль—в кокиль следует учитывать торможение усадки. Так, при толщине стенки отливки 30—40 мм расчетная усадка чугуна уменьшается на 0,2—0,3% [146].

Отливку как мастер-модель применяют также при изготовлении гипсовой модели кокиля. Один из способов копирования поверхности отливки заключается в том, что на последнюю наносят слой меламина или полиэфирной смолы. Затем полученную таким образом оболочку соединяют с гипсовой или деревянной основой.

В заключение необходимо подчеркнуть, что к литым заготовкам кокилей необходимо относиться как к отливкам наиболее ответственного назначения. Это следует учитывать при выборе расположения отливки в форме, литниковой системы, вентилирования полости формы и т. д.

Составы чугунов. Из практики литья в кокиль известно, что чугунные стенки в пределах одной марки металла могут иметь существенно различную стойкость. В то же время при разных условиях нагружения, но весьма близких свойствах материала стенки ее стойкость также будет различной. Все дело в том, что стойкость чугуна зависит от его химического состава и структуры (графита и металлической основы). Понятно, что эти тонкости качества металла не учитываются стандартными показателями свойств чугуна. Излагаемые ниже материалы необходимо рассматривать как дополнение к общим рекомендациям, приведенным в параграфе 2 гл. VIII.

Как уже отмечалось (см. гл. VIII), пониженное содержание серы в сером чугуне способствует повышению стойкости кокилей. Аналогичная закономерность наблюдается при понижении концентрации фосфора и марганца (рис. 73).

Опытами установлено, что для кокилей тонкостенных (3—5 мм) отливок целесообразно применять чугун с феррито-графитной эвтектикой. Такие кокили имеют более высокую стойкость, чем при перлитной или ферритной металлических основах и крупных разветвленных включениях графита. Особенно хорошо они противостоят короблению.

Для таких же условий хорошо зарекомендовал себя серый чугун следующего состава, % по массе: 2,8—3,2 C; 1,3—1,7 Si;

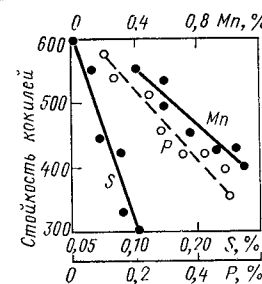


Рис. 73. Влияние содержания S, P и Mn на стойкость чугунного кокиля (число заливок)

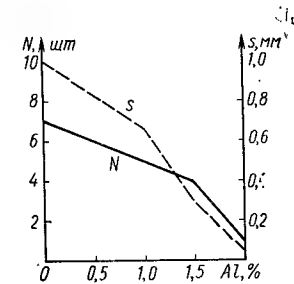


Рис. 74. Влияние алюминия на число N и суммарную ширину S трещин в чугуне

0,55—0,9Mn; до 0,10 P; до 0,12 S; 0,7—0,9 Cu; 0,3—0,7 Ni; 0,08—0,1 Ti.

На рис. 74 приведены результаты испытания чугуна, легированного алюминием, при термоциклировании. Как видно, с повышением содержания алюминия трещиностойкость существенно повышается. При содержании в чугуне свыше 1,0% Si легирование алюминием вызывает образование крупных и грубых включений графита, что недопустимо для условий периодического теплового нагружения. Поэтому рекомендуется сочетать легирование чугуна алюминием с ускоренным его охлаждением (например, с помощью холодильника), либо с дополнительным вводом олова в качестве перлитизатора. В последнем случае стойкость чугунов увеличивается на 25—30%.

Итак, для кокилей средних по массе отливок (десятки килограмм) может быть рекомендован чугун следующего состава, % по массе: 3,3—3,5 C; 1,7—2,1 Si; 0,4—0,6 Mn; ~2,0Al; ~0,1 Sn. Микролегирование обычного чугуна оловом (до 0,15%) повышает также стойкость тяжело нагруженных кокилей [153].

Известны данные о положительном влиянии сурьмы в аналогичных условиях [36]. На крышке кокиля массой 4,5 т (для получения отливок массой 1 т) из чугуна СЧ 15—32 первые трещины появлялись после семи заливок. Крышки окончательно выходили из строя через 120 заливок. При легировании чугуна 0,3 Sb стойкость повышалась до 210 отливок.

На рис. 75 показано изменение твердости чугуна и числа трещин N при 150 теплосменах в зависимости от содержания сурьмы. Как видно, наибольшей термостойкостью обладает чугун, содержащий 0,1—0,3% Sb. Эти результаты находятся в полном соответствии с приведенными выше. В связи с перлитизацией металла (проявляется в росте твердости, рис. 75) увеличивается стойкость формы против коробления.

Из других способов повышения прочности чугунов в условиях термической усталости можно отметить легирование Ni, Cr и

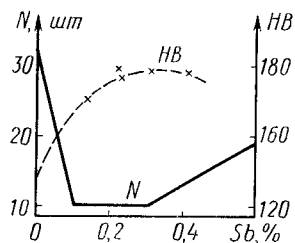


Рис. 75. Влияние содержания сурьмы на твердость HB чугуна и число трещин N при периодическом тепловом нагружении

Сu (0,7—1,0%). В последнем случае чугун приобретает перлитную структуру.

Для кокилей, работающих в условиях большого теплового нагружения, можно рекомендовать чугуны, легированные хромом и молибденом.

Что же касается чугунов с шаровидным графитом, то эти чугуны должны иметь феррито-перлитную матрицу. Способы получения заданной структуры чугуна с шаровидным графитом хорошо известны, выбор каждого из них зависит от конкретных условий (толщина стенки кокиля, способ модифицирования и т. п.).

Термическая обработка. Эта технологическая операция является обязательной при получении стальных заготовок кокилей, что связано с необходимостью изменения литой структуры. Практический опыт указывает на необходимость строгого исполнения заданного режима термической обработки. С аналогичной целью проводят термическую обработку заготовок из чугуна с шаровидным графитом.

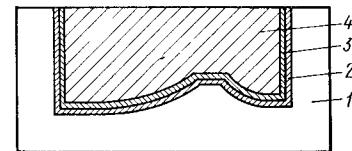
Термическую обработку проводят также для снятия остаточных технологических (литейных, сварочных и т. п.) напряжений. Остаточные напряжения при первых заливках могут вызвать разрыв рабочей стенки (трещины первого рода), либо коробление формы вследствие релаксации.

Сталь марки 15Л-II (см. табл. 20) подвергают нагреву до 1190—1300 К, выдержке в течение 3—4 ч, охлаждению на воздухе, отпуску при 820—870 К в течение 2—3 ч. После указанной выдержки отливки охлаждают в печи до 520 К и далее на воздухе. Механические свойства отливок: $\sigma_b \geq 400$ МПа, $a_n \geq 0,7$ МДж/м² и $\delta \geq 24\%$.

Сталь марки 15ХМЛ загружают в печь при температуре не выше 570 К. Затем подвергают нагреву до 920—940 К в течение 7—10 ч, выдержке в течение 2 ч, дальнейшему нагреву со скоростью не более 100 град. в час до 1150—1170 К, выдержке в течение 2 ч, охлаждению на воздухе до 720 К, посадке в печь при 720 К, нагреву до 890—920 К, выдержке в течение 8—10, охлаждению с печью до 570 К и далее на воздухе. Механические свойства отливок после термообработки: $\sigma_t \geq 250$ МПа; $\sigma_b \geq 450$ МПа; $\delta \geq 18\%$; $a_n \geq 0,5$ МДж/м²; $\psi \geq 30\%$.

Термическая обработка стальных рабочих стенок кокилей с жидкостным охлаждением должна производиться после приварки к ним коробок охлаждения.

Рис. 76. Схема изготовления кокиля (стержня) путем осаждения никеля на модель



С целью стабилизации размеров и геометрической формы стальные кокили перед окончательной механической обработкой и другими доводочными операциями целесообразно подвергать искусственному старению либо циклической термообработке. Режим старения: нагрев до 770—870 К, выдержка 2 ч на каждые 25 мм толщины стенки, охлаждение с печью до 470—570 К и далее — на воздухе. Режим циклической обработки: нагрев до 570 К в печи, предварительно разогретой до 1170 К, охлаждение — обдувкой воздухом (три-четыре цикла).

Приведенные режимы искусственного старения и циклической термообработки рекомендуется применять и при изготовлении чугунных кокилей. Интересно отметить, что на некоторых заводах с успехом применяют циклический нагрев со стороны рабочей поверхности заготовки кокиля. Для этого используют печи типа кузнечных горнов либо наливают расплав на заготовку.

К особым случаям можно отнести различные способы упрочнения рабочей поверхности кокиля.

Повышение стойкости кокилей достигается с помощью поверхностного легирования литой заготовки. В качестве легирующих элементов используют алюминий, кремний, никель и др. Технология поверхностного легирования имеет свои особенности и тонкости. Поэтому целесообразно сослаться на работу [25], где этот вопрос рассмотрен подробно.

В работе [113] описано напыление кокилей из стали Ст3 для литья титановых сплавов вольфрамом и молибденом. Напыление проводили плазменными горелками. Лучшие результаты показало напыление молибденом слоем толщиной 0,15—0,25 мм. Через несколько теплосмен молибден диффундировал в подложку, обеспечивая повышение термостойкости.

Получены положительные результаты при диффузионном насыщении кокилей слоем карбита титана толщиной 30—70 мкм [83]. Такое покрытие повышает в 2—7 раз стойкость кокиля, предупреждает смачивание алюминием рабочей поверхности формы из чугуна или стали и улучшает качество поверхности отливки.

Оригинальный способ изготовления двухслойных элементов показан в виде схемы на рис. 76 (Пат. Японии № 39591). Мастер-модель 1 электроосаждением никеля покрывают слоем 2 толщиной 1—2 мм. На этот слой наносят слой 3 эпоксидной смолы и вставляют металлический стержень 4. После отверждения смолы стержень с нанесенными на него слоями снимают с модели. Получен-

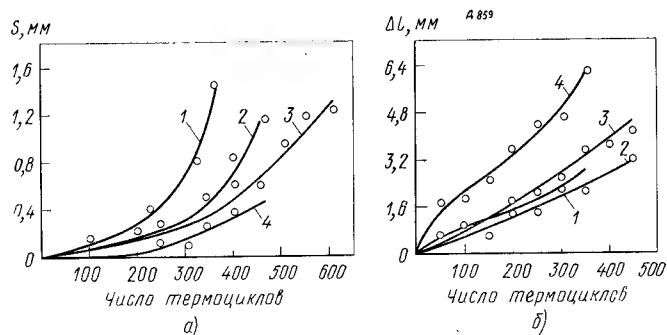


Рис. 77. Зависимость ширины трещин s (а) и деформации Δl (б) образцов из различных материалов от продолжительности испытания (числа циклов — заливок):
 1 — СЧ 18—36; 2 — ЖЧХ; 3 — ВЧ 50—3; 4 — сталь 30ХНМЛ

ные таким образом элементы рекомендуют для литья чугуна и стали.

Для получения на кокиле слоя с особыми свойствами в НИИСЛе предложен процесс наплавки стали жаропрочными электродами типа ОЗЛ—25Б, изготовленными из сплава ХН78Т (ЭИ435). Наплавка кокилей в местах интенсивного разгара повышает их стойкость в 3—4 раза [145].

К перспективным процессам изготовления литых заготовок стальных кокилей относится и электрошлаковое литье. Данный способ позволяет получать плотные, изотропные заготовки, имеющие повышенные значения ударной вязкости при высоких температурах, что является основным фактором стойкости стальных кокилей (см. параграф 2 гл. VIII).

К особым случаям могут быть причислены и способы изготовления металлических стержней и вставок (см. параграф 5 гл. X). Относительно небольшие их габаритные размеры расширяют возможности выбора материалов и способов изготовления. В частности, для изготовления таких элементов применяют инструментальные стали. На рис. 77 представлены результаты испытаний элементов кокилей из различных материалов при периодическом тепловом нагружении. Как видно, из испытанных материалов наиболее высокую трещиностойчивость имеет сталь 30ХНМЛ, а устойчивость против деформации — жаростойкий чугун ЖЧХ.

2. ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОКИЛЕЙ

Термический режим. В аналитические формулы, описывающие условия охлаждения и, следовательно, формирования свойств отливки, входит начальная температура кокиля $T_{2н}$ (см. гл. II). Значит необходима организация такого режима литья, при кото-

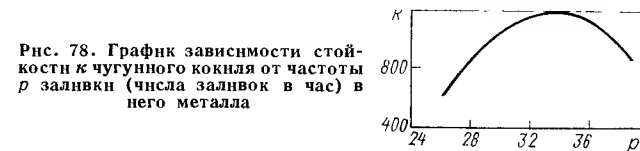


Рис. 78. График зависимости стойкости K чугуна от частоты p заливок (числа заливок в час) в него металла

ром обеспечивается потребное значение $T_{2н}$. Величина $T_{2н}$ зависит от многих факторов и, прежде всего, от природы сплава. Поэтому рекомендации по выбору $T_{2н}$ для конкретных сплавов указаны в третьем разделе.

При анализе напряженного состояния кокилей (см. гл. V) отмечалось, что с увеличением $T_{2н}$ уменьшаются остаточные напряжения в кокилях из упруго-пластичных материалов. Отмечалось также, что при перегреве кокиля интенсифицируются многие процессы (обезуглероживание, коррозия, насыщение серой, рост и др.), приводящие кокиль к разрушению; именно это учтено при выводе формулы (132) для определения толщин вставок кокилей. Входящая в эту формулу температура поверхности формы $T_{п\max}$ не должна превышать определенной величины (зависящей от материала кокиля): для чугуна $T_{п\max} \leq 920$, для алюминия $T_{п\max} \leq 600$ —650 К (гл. VI). Но из формул гл. II следует, что $T_{п\max}$ связана с $T_{2н}$. Следовательно, начальная температура формы является важным фактором ее стойкости.

Итак, организация термического цикла кокиля должна быть подчинена задаче обеспечения определенного значения $T_{2н}$. Здесь возможны варианты: выбор режима охлаждения (нагрева) кокиля при заданном темпе заливки в кокиль или обеспечение определенного режима заливки при существующей системе охлаждения (нагрева) формы.

На основании изложенного нетрудно предугадать, что нарушение темпа заливки как в сторону уменьшения, так и увеличения приводит к снижению стойкости кокилей. Это положение хорошо известно в практике литья и иллюстрируется примером, показанным на рис. 78. К этому надо добавить, что при двусменной эксплуатации стойкость выше, чем при односменной.

Инженерные решения систем принудительного охлаждения кокилей описаны в гл. VIII, где рассмотрены основы конструирования кокилей. Дополнительные примеры таких систем даны при обсуждении технологии получения отливок из конкретных сплавов (см. третий раздел). Здесь же укажем на необходимость подогрева кокилей перед первой (после длительного перерыва) заливкой и, в ряде случаев, «утепления» кокилей при литье тонкостенных деталей.

Выбор параметров систем охлаждения (нагрева) кокилей может быть осуществлен с помощью расчетного аппарата гл. II

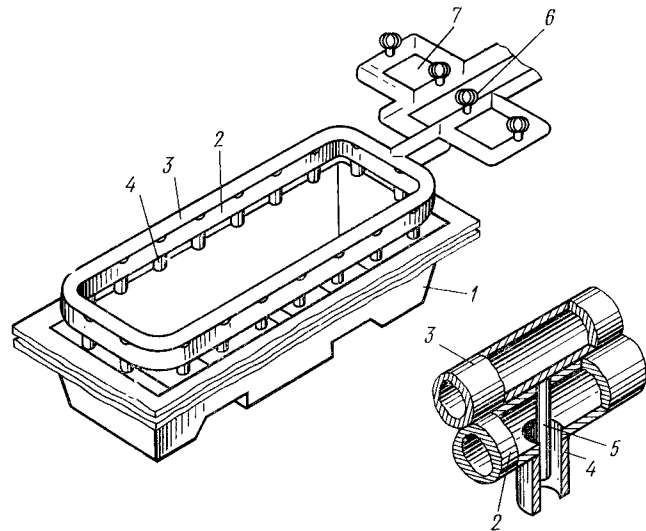


Рис. 79. Устройство для нагрева кокилей:

1 — кокиль; 2 и 3 — трубы подвода газа и воздуха; 4 и 5 — «сопла»; 6 и 7 — вентили

и в особых (частных) случаях — на базе специальных работ по литейной теплофизике [3, 6, 18—24 и др.].

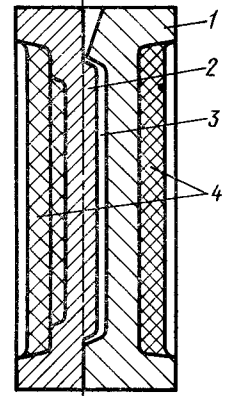
Примеры устройств для нагрева и охлаждения. На рис. 79 приведена схема устройства для нагрева кокилей газом. Подача газа и воздуха регулируется вентилями 6 и 7. Число сопел определяется габаритными размерами кокиля 1. Нагрев осуществляется за 5—7 мин.

Схема кокиля с «утеплением» показана на рис. 80. При наружной тепловой изоляции кокиля уменьшается опасность его переохлаждения. Аналогичная цель в двухслойных кокилях достигается с помощью зазора между рабочей стенкой и корпусом (см. гл. X).

Нагрев кокилей при вводе в работу необходимо вести медленно. Следует избегать нагрева заливкой металла. Если же такой нагрев оказывается единственно возможным, то рабочую полость кокиля перед заливкой надо обмазать смесью машинного масла и графита. Особенно отрицательно сказывается на стойкости формы заливка в холодный неокрашенный кокиль.

Нанесение покрытий. Значение и свойства покрытий подробно рассмотрены в гл. VI. Дополнительные сведения о конкретных составах для различных сплавов содержатся в третьем разделе. Здесь же необходимо подчеркнуть, что теплозащитные покрытия следует своевременно восстанавливать. В последние годы достигнут некоторый прогресс в автоматизации процесса нанесения

Рис. 80. Схема кокиля с наружной тепловой изоляцией:
1, 2 — рабочие стенки кокиля; 3 — рабочая полость; 4 — тепловая изоляция



разовых покрытий. Соответствующие механизмы и устройства рассмотрены в четвертом разделе.

Важным моментом эксплуатации кокиля является очистка его рабочей поверхности от изношенного покрытия (разового и много-разового использования, гл. VI). Вопросы очистки формы интересуют многих ученых [40, 166 и др.]. Интересен опыт применения беспыльного дробеметного аппарата ГИЛ-2А для очистки кокилей [40].

На стойкость покрытий заметно влияют шлаки. Быстрое разрушение наблюдается при рафинировании чугуна криолитом. Поэтому перед заливкой необходимо тщательно снимать с ковша шлак.

Ремонт кокилей. Система организации ремонта кокилей зависит от их сложности и условий производства. Ее следует разрабатывать применительно к конкретным условиям, но всегда необходимо предусматривать плано-предупредительный ремонт.

Мелкие трещины или небольшие повреждения рабочих стенок можно ремонтировать с помощью пасты следующего состава, % по массе: 60 пылевидного кварца; 30 огнеупорной глины; 9,5 жидкого стекла; 0,5 марганцевокислого калия и воды до плотности 1,42—1,50 г/см³.

Наиболее популярный и доступный способ ремонта кокилей — заварка дефектов и наплавка. При этом явное преимущество стальных кокилей; процесс их ремонта сваркой прост, требуется лишь тщательная подготовка мест заварки. Путем наплавки стальным рабочим стенкам можно придавать особые свойства (см. гл. IX).

Существующие способы ремонта сваркой (кроме сварки в нагретом состоянии) чугунных кокилей не обеспечивают получения однородного по структуре и свойствам слоя наплавленного металла. Между тем, требование получения в шве чугуна однородной структуры без отбела и с оптимальными свойствами является обязательным условием, так как наплавленный металл в них не только должен подвергаться последующей обработке резанием, но и обладать свойством чугунных кокилей.

Одним из перспективных способов получения высококачественного сварного соединения для ремонта кокилей является электродуговая сварка чугунными электродами со специальной

титано-графито-кремнистой обмазкой с подогревом до 570—670 К (А. с. № 210982).

Установлено, что наплавленный металл, содержащий 0,8% Ti (15% ферротитана в покрытии), обладает практически вдвое большей термической выносливостью, чем основной металл, имеет мелкозернистую, плотную перлитную структуру и легко обрабатывается обычным режущим инструментом. Перед восстановлением отработанных кокилей с поверхности дефектных мест следует снимать окисленный слой металла.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ КОКИЛЕЙ

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В последние годы предложены оригинальные технические решения, позволяющие повысить стойкость, обеспечить податливость и газопроницаемость кокиля, упростить технологию его изготовления, а также создать особые условия охлаждения и, следовательно, формирования отливки. Такого рода предложения могут быть обобщены понятием специальные виды кокилей.

Кокили специальных видов находят применение для производства в основном особых отливок в условиях мелкосерийного производства, а такая их разновидность как двухслойные и при массовом производстве. При создании специальных кокилей руководствовались идеей расчленения стенки формы на элементы.

Напряжения и деформации при расчленении стенки кокиля. Из механики деформируемого тела известно, что термические напряжения в нагреваемом теле являются следствием нереализованной термической деформации. Ограничения на термическую деформацию волокон рабочей поверхности кокиля накладывают менее нагретые участки, находящиеся вне рабочей зоны формы (обрамление, коробка жидкостного охлаждения и т. п.), скрепляющие форму устройства (зажимы, кокильная машина) и менее нагретые слои рабочей стенки.

Сложность напряженного состояния рабочей части кокиля предопределяет различные пути ее разгрузки. Один путь заключается, например, в раскреплении разъемных кокилей сразу же после окончания заливки. Однако радикальное решение дает расчленение рабочей стенки — поперечное, продольное и комбинированное [25].

При поперечном расчленении температурное поле по всем направлениям вдоль стенки кокиля становится более однородным. Следовательно, каждый элемент площадью F_i испытывает меньшее ограничение термической деформации со стороны соседних частей формы. Кроме того, вследствие зазоров между элементами термическая деформация вдоль стенки свободна. Ясно, что чем меньше F_i , тем больше разгрузка. В предельном случае величина термических напряжений при поперечном расчленении пропорциональна только градиенту температур по толщине стенки кокиля.

При продольном расчленении стенки разобщаются более и менее нагретые слои. Следовательно, в рассматриваемом случае уменьшаются температурные напряжения, связанные с температурным градиентом. Кроме того, в некоторых кокилях снимаются ограничения с температурных деформаций вдоль стенки. В качестве примера здесь могут быть названы цилиндрические кокили

с вставным вкладышем, который имеет, по крайней мере, один свободный торец.

Из предыдущего ясно, что наиболее полную разгрузку элемента стенки кокиля можно осуществить путем поперечного и продольного расчленения, т. е. комбинированно. В этом случае теоретически кокиль должен обладать бесконечно большой стойкостью. Однако на практике это не так: на стойкость влияют коррозия, структурные изменения, эрозия и другие процессы, причем многие из них интенсифицируются с расчленением стенки кокиля. Однако суммарный эффект — в пользу расчленения.

Расчленение позволяет также уменьшить коробление кокиля. Анализ показывает, что термическое выпучивание плоской стенки

$$f = m \frac{3n\alpha_m \delta T_2}{4(n+1)(n+2)} \frac{L_1^2 + L_2^2}{X_2}, \quad (129)$$

где δT_2 — перепад температур; m — коэффициент, зависящий от условий закрепления стенки; n — показатель параболы, описывающей температурное поле стенки; X_2 — толщина; L_1 и L_2 — длина и ширина стенки. Формула (129) описывает упругое выпучивание. Как видно, уменьшение габаритных размеров кокиля позволяет резко снизить коробление рабочей стенки: величина f зависит от квадрата габаритных размеров L_1 и L_2 . Специальными исследованиями установлено, что при этом уменьшаются также температурные напряжения.

Податливость. Если выполняется условие $L \leq X_2$, то элементы, применяемые при изготовлении кокилей, никогда не могут быть идеально прямыми и гладкими. Поэтому в пакете они всегда несколько пружинят и, в зависимости от силы зажатия пакета, располагают большей или меньшей возможностью деформироваться.

Газопроницаемость. Кокили с рабочей стенкой из элементов, разобщенных в поперечном направлении, имеют высокую газопроницаемость. Необходимую величину газопроницаемости стенки можно найти на основании следующих соображений [25]. Согласно экспериментальным данным, абсолютное давление p в полости кокиля обычно бывает меньше 0,2 МПа, т. е. меньше критического. Это значит, что для расчета можно пользоваться термодинамическими соотношениями, выведенными для докритического режима истечения. Кроме того, если учесть, что каналы между элементами имеют малую толщину и сравнительно большую длину, при которых силы вязкостного трения приобретают существенное значение, тогда можно будет пренебречь сжимаемостью и рассматривать простейший ламинарный режим истечения газа в соответствии с законом фильтрации Дарси.

Расчетная формула истечения имеет вид

$$\Delta V = K_r \frac{\Delta p}{\Delta l} F \Delta t,$$

где ΔV — объем газа, прошедшего через поверхность площадью F за время Δt , м³; K_r — коэффициент газопроницаемости, м⁴/(Н·с); Δp — разность давлений газа между полостью формы и окружающей средой, Па; Δl — длина канала, м.

Коэффициент газопроницаемости K_r в литейном производстве принято выражать в единицах см⁴/(гс·мин), причем 1 см⁴/(гс·мин) = $0,017 \cdot 10^{-6}$ м⁴/(Н·с).

Коэффициент газопроницаемости связан с известными коэффициентами Дарси K и проницаемости k соотношениями

$$K_r = \frac{K}{\gamma};$$

$$K_r = \frac{k}{\mu},$$

где γ — удельный вес газа, Н/м³; μ — коэффициент динамической вязкости газа, Н·с/м². Наличие двух последних соотношений позволяет воспользоваться для расчетов любыми из имеющихся под рукой данными по свойствам капиллярнопористого тела.

Если принять, что время истечения газа равно времени t_1 заливки металла, а объем газа равен объему $V_{от}$ отливки, тогда минимальное значение K_r определится по формуле

$$K_r = \frac{V_{от} \Delta l}{F \Delta p t_1}. \quad (130)$$

В расчетной формуле (130) неизвестной величиной является разность давлений Δp (Па). Она может быть приближенно найдена как сумма статического давления $p_{ст}$ столба жидкого металла и динамического напора p_d , который возникает при попадании металла в литниковую систему с определенной скоростью u . Имеем

$$\Delta p = p_{ст} + p_d = \gamma_1 H + \rho_1 \frac{u^2}{2},$$

где γ_1 — удельный вес заливаемого металла, Н/м³; H — высота формы от нижней части отливки до верха литниковой чаши, м; ρ_1 — плотность жидкого металла отливки, кг/м³. Если пренебречь скоростью металла на носике ковша, тогда эта формула запишется в виде

$$\Delta p = \gamma_1 (H + h),$$

где h — расстояние от носика ковша до литниковой чаши. Объем $V_{от}$ может быть уточнен, если учесть некоторый разогрев газа

в процессе заполнения кокиля расплавом. Приближенно можно считать, что расчетное значение

$$V_{\text{от. расч}} = V_{\text{от}} \frac{T_2}{T_{2н}},$$

где T_2 — температура кокиля в конце процесса заливки, К; $T_{2н}$ — начальная температура кокиля, К.

Однако это уточнение существенного значения не имеет.

Более существенным может оказаться уточнение, связанное с учетом скорости заполнения металлом кокиля. При этом скорость заполнения задается. Например, она может быть принята постоянной в течение всего периода заливки. Тогда объем полости и газа в ней будет уменьшаться обратно пропорционально времени. В этих условиях давление Δp является величиной переменной, зависящей от конкретных особенностей процесса. Однако не имеет смысла применять и это уточнение, так как оно усложнит расчетный аппарат, но не изменит сильно описанную выше принципиальную схему процесса вентиляции кокиля. Здесь не рассматривается также вопрос о влиянии противодействия Δp газа на время t_1 заливки расплава.

С учетом сжимаемости газа формула для расчета K_r имеет вид [65]:

$$K_r = 2 \frac{V_{\text{от}} (p_0 + \Delta p) \Delta l}{\Delta p (2p_0 + \Delta p) t_1 F}, \quad (131)$$

где p_0 — давление окружающей среды.

Сравнение формул (130) и (131) показывает, что сжимаемостью газа можно пренебречь, если выполняется условие $\Delta p \ll p_0$. Обе формулы соответствуют стационарному режиму фильтрации газа. Уточненный анализ фильтрации газа (с учетом нестационарности) показывает, что при реальных для литейной формы параметрах (и, в частности, значениях K_r) стационарный подход к расчету вентиляции кокиля вполне обоснован.

На рис. 81 изображены схема экспериментального кокиля и результаты измерений давления и температуры газа в его полости в период заливки металла [25]. В качестве заливаемого металла использовали латунь ЛК 80-3. Кокиль 1 имеет вид опрокинутого стакана. Полученные в опытах с ним результаты (А. И. Вейник, А. А. Потапов) являются весьма характерными. Из рис. 81, б видно, что в процессе заливки ($t_1 = 5$ с) избыточное давление Δp газа в полости постепенно растет, достигая значения, равного сумме статической ($p_{\text{ст}}$) и динамической (p_d) составляющих, причем величина $p_{\text{ст}}$ определяется высотой H , а p_d — высотой h . Этот результат подтверждает предпосылки, положенные в основу вывода расчетных формул. Весьма любопытно, что сразу же после прекращения заливки, когда динамическая составляющая p_d

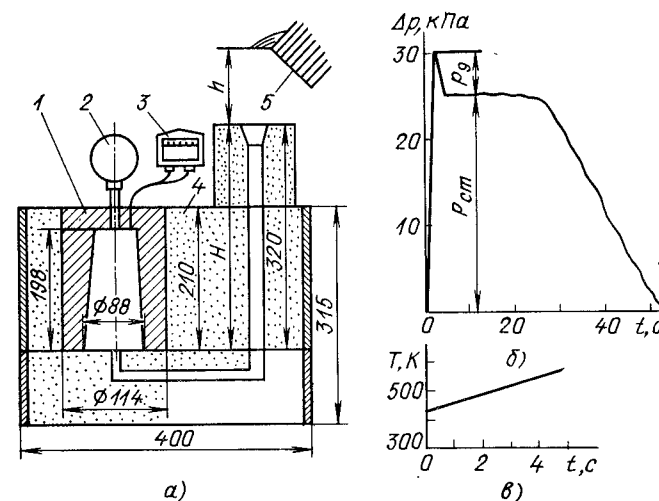


Рис. 81. Схема экспериментального кокиля (а) и зависимость избыточного давления (б) и температуры (в) газа от времени:

1 — кокиль; 2 — манометр; 3 — потенциометр; 4 — песчано-глинистый стержень; 5 — заливочный ковш

обращается в нуль, давление в полости становится равным статической составляющей $p_{\text{ст}}$. Это давление сохраняется до момента затвердевания металла в литниковом канале или образования на поверхности отливки твердой корки, что препятствует передаче напора H газу.

Температура T газа (рис. 81, в) изменяется с изменением температуры кокиля. В начальный момент она равна начальной температуре $T_{2н}$ кокиля, в конце заливки она близка к изменившейся температуре кокиля. При определении расчетного объема $V_{\text{от. расч}}$ в качестве T_2 можно использовать среднее значение температуры за процесс.

В описанном опыте оказалось, что отношение $\Delta p/p_0$ составляет примерно 0,3. Поэтому при расчете в данном случае может быть применена формула (130).

2. КОКИЛИ ИЗ НОРМАЛИЗОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

При расчленении стенки кокиля на части стремятся сделать их универсальными и нормализованными. Такие части (элементы) могут иметь в сечении квадрат, прямоугольник, треугольник, шестиугольник, круг и т. д. При поперечном расчленении возникают вопросы, связанные с выбором размеров отдельных частей, способа их крепления и т. д. Многие из этих вопросов

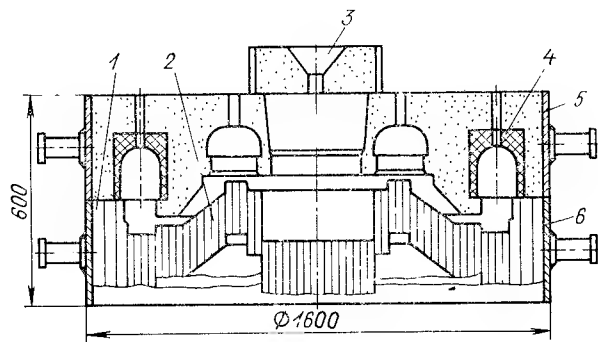


Рис. 82. Схема кокиля из нормализованных элементов:

1 — элементы квадратного сечения; 2 — элементы круглого сечения; 3 — литниковая чаша; 4 — облицовка прибыли; 5 — верхняя полуформа; 6 — нижняя полуформа

обсуждаются в работах [21, 24, 25]. Ниже рассматривается лишь один из примеров.

На рис. 82 показана схема кокиля для изготовления зубчатого колеса из стали 30СГЛ массой 580 кг и диаметром около 1150 мм (А. И. Вейник, А. А. Потапов). Кокиль состоит из двух полуформ — верхней и нижней. Верхняя полуформа 5 изготовлена из быстросохнущей жидкостекольной смеси. Облицовка 4 прибыли изготовлена из смеси опилок, асбестовой крошки и жидкого стекла.

Нижняя полуформа 6 образована стальными элементами 1 размером $30 \times 30 \times 250$ мм и круглыми элементами 2 — отрезками стального проката диаметром 8—10 мм и длиной 200 мм. Нижняя полуформа 6 покрыта изнутри слоем кокильной краски.

3. ИГОЛЬЧАТЫЕ КОКИЛИ

Кокиль, изготовленный из элементов в виде отрезков проволоки небольшого диаметра, получил название игольчатого. История вопроса, теоретические и экспериментальные данные, обосновывающие возможность и целесообразность применения игольчатых кокилей, приведены в работах [21, 24, 25].

Упругие деформации отдельных проволок суммируются. Податливость кокиля при этом такова, что удастся отлить в нем коленчатый вал из цериевого чугуна [21]. Для количественного определения податливости игольчатого кокиля были выполнены две серии экспериментов (А. И. Вейник, А. И. Храмченков). В первой серии отливали кольца с внутренним диаметром 98 мм, высотой 30 мм и со стенками различной толщины. Наружная поверхность кольца оформлялась песчаной формой, внутренняя —

Рис. 83. Влияние различных факторов на податливость иголок

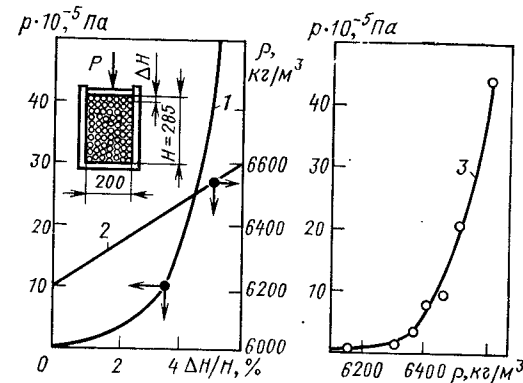
стальным игольчатым стержнем (диаметр иголок 2 мм). Опыты показали, что кольца толщиной 3 мм, изготовленные из чугуна и сплава АЛ8, трещин не имеют.

Результаты второй серии экспериментов приведены на рис. 83.

Пакет стальных иголок диаметром 2 мм и длиной 130 мм подвергали сжатию. Кривые 1 и 2 соответствуют изменению давления и плотности в зависимости от относительной деформации пакета. Кривая 3 получена при разных значениях плотности (применена различная упаковка иголок), но одинаковой относительной деформации $\frac{\Delta H}{H} = 1\%$. Как видим, игольчатый кокиль обладает вполне удовлетворительной податливостью.

Газопроницаемость игольчатого кокиля является следствием продольных каналов между проволочками. Его способность пропускать через себя газы может быть описана формулой (130) или (131). На рис. 84 приводятся результаты испытаний на газопроницаемость пакетов иголок в виде образцов диаметром и длиной 50 мм [21]. Для определения газопроницаемости формовочных смесей иголки набивали в стандартную гильзу прибора. Точками изображены опытные значения. Теоретические кривые 1 и 2 построены по известной формуле Козени. Около кривых показаны схемы возможной упаковки иголок. Самая плотная упаковка соответствует кривой 2, самая неплотная — кривой 1 (при небрежном изготовлении может быть еще худшая упаковка, однако такой неблагоприятный случай здесь не рассматривается). Из рисунка видно, что с увеличением диаметра d иголок газопроницаемость игольчатой вставки (или кокиля) резко возрастает. Более плотной упаковке иголок соответствует меньшее значение K_r . Во всех случаях газопроницаемость игольчатой стенки формы выше средней газопроницаемости сырой песчаной формы [штриховая прямая 6, для которой $K_r = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{Н} \cdot \text{с}) = 100 \text{ см}^4/(\text{кг} \cdot \text{мин})$].

Экспериментальные данные укладываются между теоретическими кривыми 1 и 2, соответствующими различным схемам упаковки (3 — стальные иголки, 4 — медные иголки). Шлифованные иголки при тщательной упаковке дают практически сов-



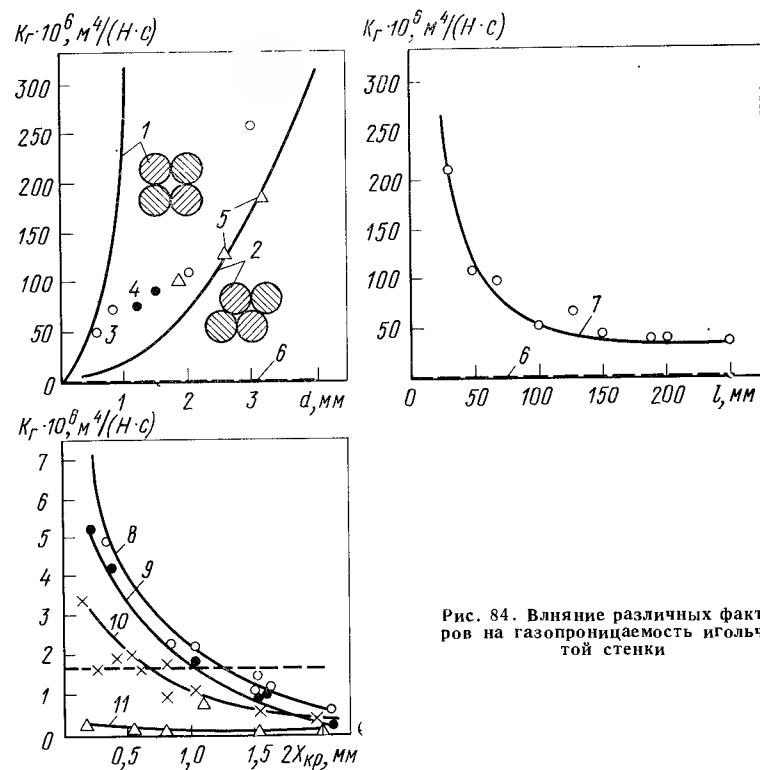


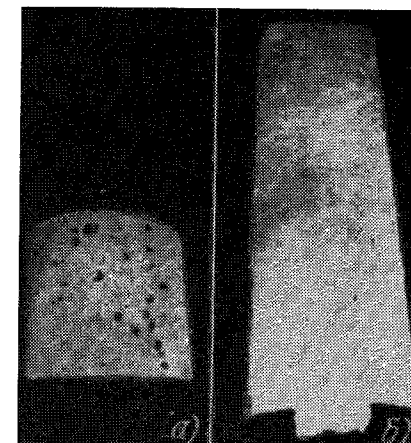
Рис. 84. Влияние различных факторов на газопроницаемость игольчатой стенки

падающие с кривой 2 данные (точки 5). Опыт показывает, что в реальных условиях приходится иметь дело с промежуточным случаем между предельными возможностями.

В специальных гильзах диаметром 50 мм и различной длины была исследована газопроницаемость пакетов при различной длине l иголок. Результаты опытов со стальными иголками диаметром $d = 2$ мм приведены на рис. 84 в виде кривой 7. Видно, что с увеличением l газопроницаемость кокиля вначале быстро, а затем очень медленно падает, однако она все время остается на уровне, значительно превышающем среднюю газопроницаемость сырой формовочной смеси.

Газопроницаемость игольчатых элементов уменьшается при нанесении на них краски. Влияние краски было исследовано на пакетах стандартных размеров; стальные иголки имели диаметр 1,5 мм. Один из торцов образца покрывали кокильной краской. Были испытаны две краски. Пористая краска, состоящая, % по массе, из 32 маршалита, 6,15 огнеупорной глины, 1,2 древесных опилок, 0,15 $KMnO_4$, 10,5 жидкого стекла, 50 воды, дала луч-

Рис. 85. Сечение цилиндрической отливки, полученной из латуни ЛК 80—3 без применения (а) и с применением (б) игольчатых вставок



шие результаты (кривые 8 и 9). Ее наносили при температуре 520 К. Кривая 8 получена после погружения окрашенного торца пакета в жидкий чугун с температурой 1570 К на 10 с. Кривая 9 получена до погружения. Видно, что выгорание опилок и некоторых других веществ несколько повысило газопроницаемость.

Вторая краска имела состав, % по массе: 21 маршалита, 7 жидкого стекла, 72 воды. Нанесение этой краски при 370 К дало наихудшие результаты (кривая 11), нанесение краски при 520 К повысило газопроницаемость (кривая 10). Из рис. 84 следует, что при слое краски толщиной до 1 мм газопроницаемость игольчатой стенки выше газопроницаемости сырой песчано-глинистой смеси (горизонтальная штриховая прямая).

В один из кокилей, показанных на рис. 81, был вставлен сверху пакет иголок. Размеры пакета определяли по формуле (130). В кокили заливали латунь ЛК 80—3. Продольные сечения полученных таким образом отливок изображены на рис. 85, а и б. Видно, что отсутствие вентиляционных каналов (рис. 85, а) привело к браку отливки по газовым раковинам и незаполнению формы. С применением игольчатых вставок полностью ликвидировались эти дефекты; отливки были высокого качества (рис. 85, б).

Опыт показывает, что для вентиляции кокилей целесообразно использовать игольчатые вставки диаметром 15—25 мм с иголками диаметром 1—3 мм и длиной 35—50 мм. Более длинные иголки трудно запрессовывать в отверстие кокиля — они гнутся. В этих случаях целесообразно применять специальные гильзы, в которые предварительно набивают иголки. Гильзы могут быть разрезными.

Многочисленные примеры конструкций игольчатых кокилей и полученных в них латунных и чугуновых отливок содержатся в работах [21, 24, 25]. Там же приведены данные об их термофизических свойствах. Продолжительность затвердевания отливок в игольчатых кокилях на 15—25% больше, чем в обычных при одинаковом значении X_2 .

4. КОКИЛИ, ИЗГОТОВЛЕННЫЕ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Основы технологии. В кокилях, изготовленных методами порошковой металлургии, наиболее полно воплощается идея расчленения. Действительно, здесь происходит продольное и поперечное деление стенки формы. Процессы изготовления указанных кокилей успешно разрабатывает А. К. Машков с сотрудниками (Е. П. Поляков, В. И. Гурдин, В. В. Черненко). Ими же изучаются свойства металлокерамики как материала кокиля [96].

Изготовление кокиля методом порошковой металлургии заключается в том, что кокиль получают путем прессования металлического порошка в пресс-формах прямым или гидростатическим прессованием с последующим спеканием прессовок. Процесс изготовления кокилей с несложной конфигурацией литейной полости и незначительными перепадами сечений прямым прессованием дает удовлетворительные результаты. Решающую роль при этом играет тщательность изготовления матриц пресс-форм и пуансонов, имеющих конфигурацию модели отливки. Но при усложнении конфигурации рабочих полостей кокилей, увеличении вертикального габаритного размера по отношению к горизонтальному и наличии разностенности в кокиле возникают трудности в получении качественных прессовок. Главная из них — это неравномерное уплотнение порошка в объеме прессуемого изделия, в результате чего возникает расслоение, обнаруживаемое в прессовках сразу после извлечения их из пресс-форм, или происходит неравномерная усадка прессовок во время спекания. Поэтому рекомендуется метод гидростатического прессования, так как одним из основных его достоинств является равномерность распределения плотности по объему изделия. Собранный пресс-форма для гидростатического прессования показана на рис. 86.

Метод гидростатического прессования металлических порошков позволяет готовить многослойные кокили и тем самым дифференцированно регулировать теплофизические и механические свойства кокиля. Для повышения сопротивления термомеханической усталости металлокерамических материалов можно применять армирование — введение в матрицу из железного порошка марки ПЖ2М отрезков молибденовой проволоки. Испытание показало, что устойчивость против термомеханической усталости армированных материалов в несколько раз выше, чем неармированных. Это обусловлено повышением энергии зарождения и распространения трещины.

Для цилиндрических полостей кокиля армирующую проволоку располагают непосредственно на поверхности рабочей полости. Этот способ получения покрытий заключается в том, что на металлическую модель 1 внутренней полости кокиля навивают сплош-

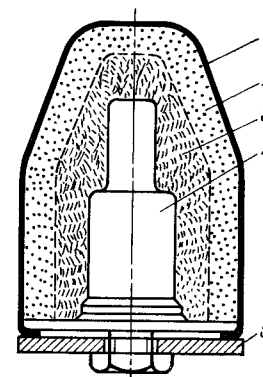


Рис. 86. Собранный пресс-форма:
1 — эластичная оболочка; 2, 3 — металлический порошок; 4 — модель; 5 — пластина

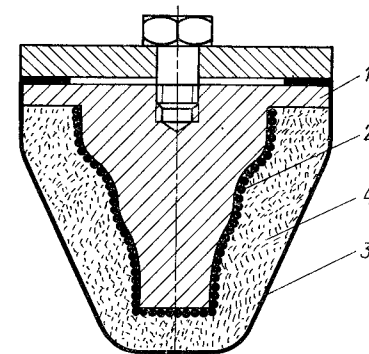


Рис. 87. Схема получения армированного кокиля

ной слой проволоки 2 нужного диаметра (рис. 87). После этого модель с проволокой помещают в эластичную герметичную оболочку 3 с металлическим порошком 4, а затем в камеру прессования для гидростатического опрессовывания покрытия металлическим порошком. Последующее спекание и пропитка железоборидным сплавом надежно соединяет покрытие с железной матрицей.

Разработан принципиально новый способ изготовления игольчатых кокилей спеканием. Он заключается в том, что на ферромагнитную модель 1 (рис. 88, а), покрытую клеевым веществом 2, воздействуют магнитным полем с помощью электромагнита 3. Затем на модель по нормали к ее поверхности закрепляют множество отрезков стальной проволоки 4, выдерживают в магнитном

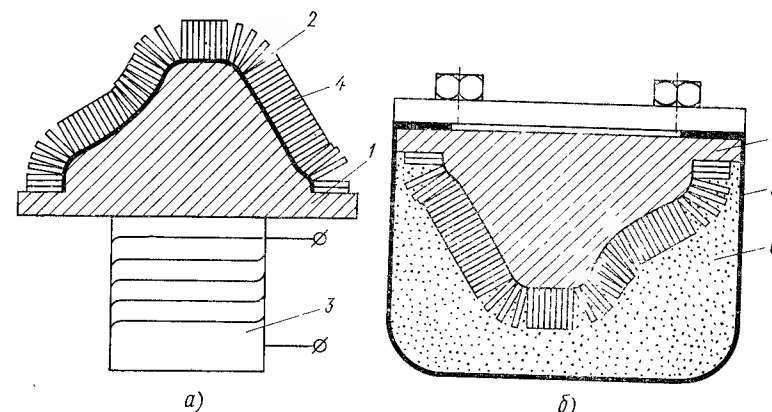


Рис. 88. Схема изготовления игольчатых кокилей, скрепленных спеканием:
а — установка иголок; б — подготовка к прессованию

поле до отвердевания клеевого слоя, жестко связывающего поверхность модели с фиксированными иглами. Далее модель с иглами помещают в эластичную оболочку 5 (рис. 88, б) с металлическим порошком 6. Оболочку герметизируют и помещают в камеру контейнера гидростатического прессования для опрессования наружных концов игл металлическим порошком.

После гидростатического прессования стальную модель извлекают из железной прессовки (во время прессования клеевой слой разрушается), прессовка спекается в вакуумной печи и, если необходимо, пропитывается железоборидным сплавом эвтектического состава, в результате чего иглы надежно фиксируются в матричном материале. Производственные испытания в условиях чугунолитейного цеха показали высокую стойкость полученных кокилей. После тысячи заливок на поверхности армированных и игольчатых кокилей трещин не обнаружено. Один из таких кокилей представлен на рис. 89.

Свойства. На рис. 90 показаны кривые изменения окалиностойкости спеченного железного порошка, пропитанного различными материалами. Там же для сравнения приведены данные для стали 20 и обычного серого чугуна. Как видно, окалиностойкость полученных материалов значительно выше, особенно в пропитанном состоянии [96].

Испытанием образцов на сопротивление термомеханической усталости при давлении $10 \cdot 10^5$ Па в диапазоне температур 470—1020 К установлено, что предел сопротивления термомеханической усталости железоборидных материалов (ЖБМ), армированных молибденовой проволокой (АЖБМ), в несколько раз выше,

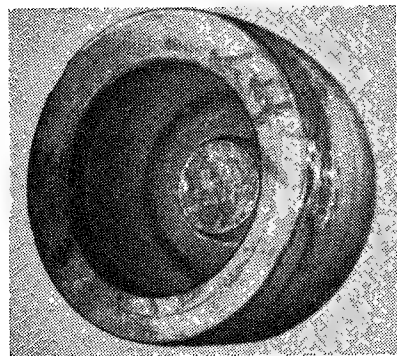


Рис. 89. Игольчатый кокиль, изготовленный спеканием

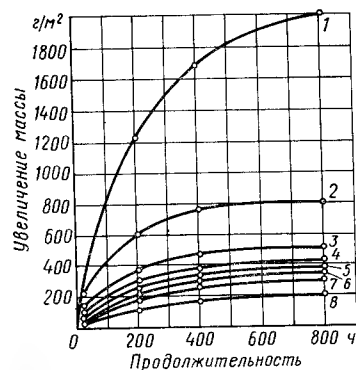


Рис. 90. Кривые изменения окалиностойкости при температуре 970 К:

1 — серый чугун; 2 — сталь 20; 3 — Fe + (Fe + 4% TiB₂); 4 — Fe + (Fe + 3,8% B); 5 — высокопрочный чугун; 6 — Fe + (Fe + 10% NbB₂); 7 — Fe + (Fe + 5% CrB₂); 8 — Fe + (Fe + 5% NbB₂ + 3% CrB₂)

чем у ЖБМ [97]. Так, образцы выдержали до разрушения следующее число циклов нагрузки: спеченный железный порошок марки ПЖ2М-60, ЖБМ-750, АЖБМ с 8% молибденовой проволоки — 1500, АЖБМ с 60% молибденовой проволоки — 7500, серый чугун — 140.

Газопроницаемость металлокерамических материалов, применяемых для изготовления рабочих стенок кокилей, дает возможность использовать вдув воздуха в форму как способ интенсификации и управления термическими условиями литья. Особенность данного метода — возможность дифференцированного воздействия на отливку как в пространстве, так и во времени.

В заключение необходимо отметить, что метод порошковой металлургии дает возможность совмещать решение задач создания материалов с заданными свойствами и придания изделиям необходимой конфигурации.

5. СОСТАВНЫЕ КОКИЛИ

В составных кокилях идея расчленения реализуется ограниченно: рабочая стенка выполняется всего из нескольких относительно крупных элементов. Составные кокили могут быть получены путем поперечного или продольного расчленения рабочей стенки. Такие формы применяют, в основном, при жидкостном охлаждении. Особенности их напряженно-деформированного и теплового состояния исследовали в НИИСЛе (Я. Б. Айзенштейн, В. С. Серебро и др.).

На рис. 91 показана схема водоохлаждаемого кокиля, в котором осуществлено поперечное деление: каждая половина кокиля состоит из двух скрепленных болтами элементов с автономным охлаждением.

Широкое применение нашли двухслойные кокили, т. е. кокили с продольным членением рабочей стенки. Рабочая стенка двухслойного кокиля представляет собой сменный вкладыш, который вставляют (рис. 92) в водоохлаждаемый корпус либо приставляют к нему (рис. 93). Интенсивность охлаждения вкладыша занимает промежуточное положение между естественным воздушным и прямым водяным охлаждением. Поэтому двухслойный кокиль допускает повышенную частоту заливок в сравнении с формой при воздушном охлаждении, но менее склонен к переохлаждению, чем при водяном. Последнее обстоятельство является преимуществом при производстве тонкостенных отливок.

В цилиндрическом двухслойном кокиле осуществляется саморегулирование начальной температуры вкладыша. Эта температура зависит от величины зазора Δ (рис. 92) между вкладышем и корпусом. При перегреве вследствие теплового расширения вкладыша зазор уменьшается и интенсивность теплообмена возрастает, а при переохлаждении происходит обратное.

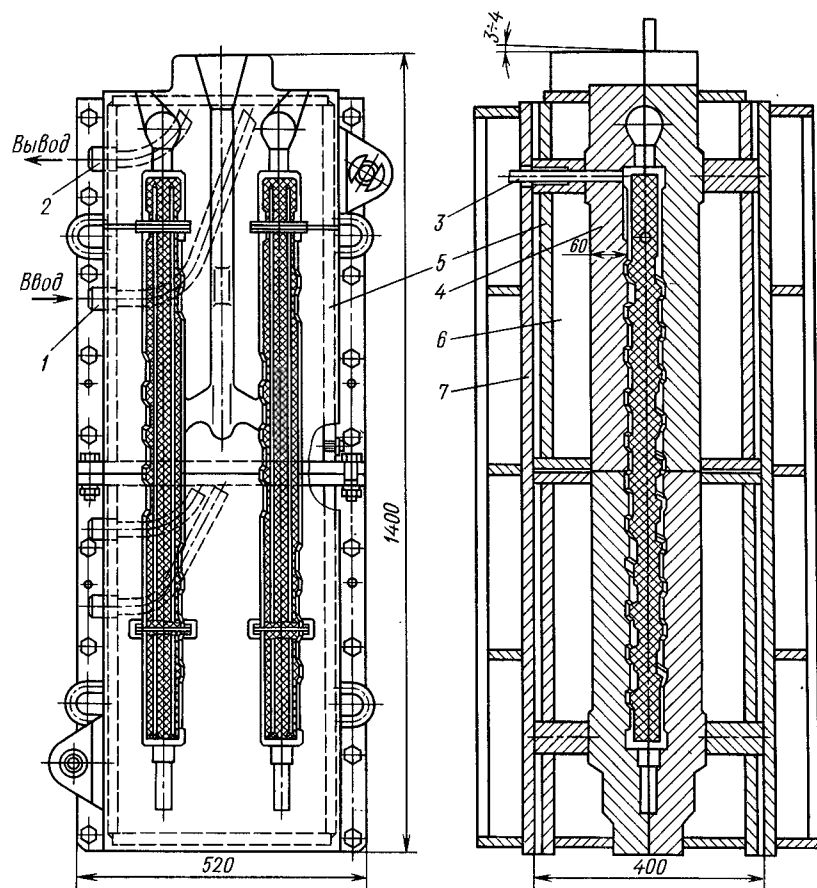


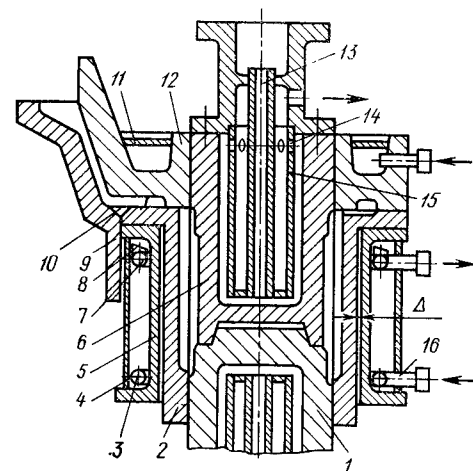
Рис. 91. Составной водоохлаждаемый кокиль с поперечным делением рабочей стенки: 1 — трубка подвода воды; 2 — трубка отвода воды; 3 — толкатель; 4 — рабочая стенка; 5 — коробка водяного охлаждения; 6 — полость охлаждения; 7 — подкокильная плита

В случае перегрева рабочей стенки двухслойного водоохлаждаемого кокиля рекомендуется зазор между стенкой и коробкой охлаждения заполнять смесью машинного масла и графита или другим материалом с повышенной теплопроводностью. Для удобства осуществления этой операции выполняется V-образная канавка 2 (рис. 93).

Двухслойные кокили имеют следующие преимущества: они безопасны, так как вода не может проникнуть в рабочую полость; уменьшаются затраты на их эксплуатацию, так как замене подлечит только вкладыш.

Рис. 92. Цилиндрический двухслойный водоохлаждаемый кокиль для получения станин электродвигателей из серого чугуна:

1 — нижний водоохлаждаемый стержень; 2 — вкладыш; 3 — кольцевой коллектор для подвода воды; 4 — водоохлаждаемый корпус; 5 — внутренняя стенка водоохлаждаемого корпуса; 6 — верхний водоохлаждаемый стержень; 7 — кольцевой коллектор для отвода воды; 8 — патрубок; 9 — съемная литниковая чаша; 10 — песчаный стержень для защиты стыка между чашей 9 и вкладышем 2; 11 — крышка кокиля; 12 — рабочая стенка крышки кокиля; 13 — трубка подвода воды в стержень; 14 — отверстие в рубашке для отвода воды из стержня; 15 — рубашка для направления потока воды; 16 — патрубок



К составным относятся такие кокили, в которых наиболее нагруженные участки оформляются сменными вставками. С помощью вставок условия работы многоместного кокиля сводятся к условиям работы одноместного. Для тонкостенных отливок тыльную сторону вставки теплоизолируют, а для толстостенных — покрывают высокотеплопроводным составом.

Особенности термических и термомеханических условий работы вставок были объектом специальных исследований (А. И. Вейник, Н. П. Дубинин, А. С. Наджафов). В результате, в частности,

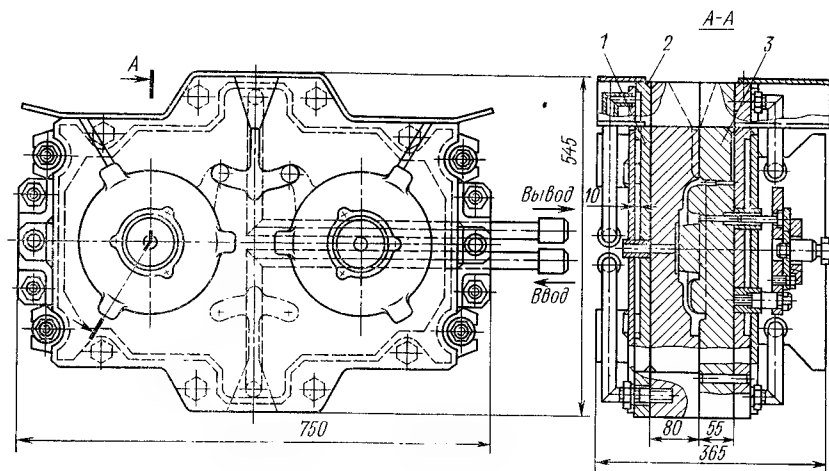


Рис. 93. Плоский двухслойный водоохлаждаемый кокиль для отливки из серого чугуна электродвигателя:

1 — водоохлаждаемый корпус; 2 — V-образная канавка для теплопроводной смазки; 3 — рабочая стенка

найденно, что толщину стенки вставки X_v следует рассчитывать по формуле

$$X_v = \frac{(n+1) Q_1}{F_v c_v \rho_v (T_{п\max} - T_{2н})}, \quad (132)$$

где n — показатель параболы, описывающей температурное поле вставки (для практических расчетов можно принять $n = 2$); Q_1 — количество теплоты, которое отдает отливка кокилю; F_v — площадь рабочей поверхности вставки; c_v — удельная теплоемкость материала вставки; ρ_v — плотность материала вставки; $T_{п\max}$ и $T_{2н}$ — максимальная температура рабочей поверхности и начальная температура вставки.

Установлено также, что рациональными являются вставки круглого или прямоугольного сечения. Начальная величина зазора $X_{зав}$ между корпусом кокиля и вставкой должна удовлетворять условию

$$\frac{\alpha_m d (T_{кр} - T_{2н})}{2 \left(1 + n \frac{\lambda_v}{\alpha_1 X_v} \right)} < X_{зав} < X_{доп}, \quad (133)$$

где d — диаметр вставки; $X_{доп}$ — величина зазора, которая допускается по условию незатекания в него расплава. Остальные обозначения в приведенном неравенстве имеют тот же смысл, что и ранее. Из практики известно, что для чугуна $X_{доп} \approx 0,5$ мм.

Вставки, размеры которых удовлетворяют выражениям (132) и (133), работают в оптимальных условиях: они разгружаются от обрамления (см. гл. V) и нагреваются на рабочей поверхности до температуры $T_{п\max}$, допускаемой природой выбранного материала вставки (см. параграф 2 гл. IX). Именно эти условия были приняты при выводе зависимостей (132) и (133).

Раздел третий

ЛИТЬЕ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ

Глава XI

ЛИТЬЕ СЕРОГО ЧУГУНА

1. ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА

Вязкость и поверхностное натяжение. Вязкость и поверхностное натяжение литейных сплавов имеют большое значение для процессов питания затвердевающей отливки, заполнения тонких полостей и взаимодействия отливки с покрытиями форм. К такому выводу легко прийти на основании материалов, изложенных в гл. IV и VI. Так, например, вязкость входит в расчетные формулы для определения ширины зоны осевой пористости [формула (38)], количества профильтровавшегося расплава через сетку кристаллов (величина коэффициента фильтрации зависит от вязкости), зоны действия прибыли [формула (47)]. С поверхностным натяжением расплава связано капиллярное давление.

На рис. 94 приведены кривые изменения кинематической вязкости ν чугуна по данным Н. И. Клочнева [66]. Как видно, для до- за- и эвтектических сплавов ν снижается с повышением температуры. Такая же закономерность существует для чистого железа [34]. Влияние основных элементов, содержащихся в чугуне, таково: углерод в доэвтектической области и фосфор понижают вязкость, кремний, сера и углерод при содержании больше эвтектического — ее повышают [119].

Поверхностное натяжение серого чугуна находится в пределах 0,7—1,1 Н/м и понижается с повышением температуры и содержания углерода [66].

Жидкотекучесть. С увеличением концентрации углерода в доэвтектическом чугуне жидкотекучесть растет, а в заэвтектическом падает. Влияние углерода усиливается с повышением содержания фосфора. Кремний и фосфор существенно влияют на жидкотекучесть: она увеличивается с увеличением концентрации этих элементов. Марганец и сера в тех количествах, в которых они обычно применяются при литье в кокиль, влияют незначительно [119].

Жидкотекучесть металла с повышением его температуры растет. Влияние кокиля на жидкотекучесть отчетливо видно из формулы (1). Жидкотекучесть повышается с увеличением начальной температуры кокиля, толщины покрытия и с понижением коэффици-

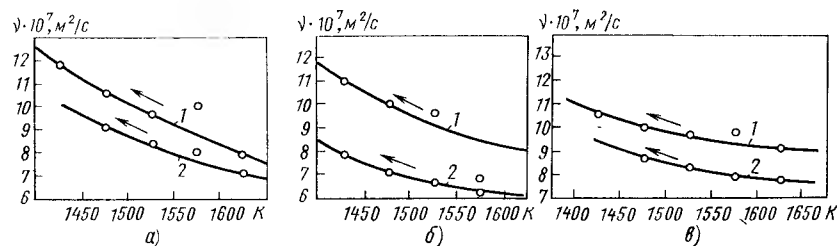


Рис. 94. Кинематическая вязкость чугунов доэвтектического (а), эвтектического (б) и заэвтектического (в) составов: 1 — до обработки магнием; 2 — после обработки магнием. Стрелками показано направление изменения температуры

циента теплопроводности его материала. Основные из рассмотренных закономерностей подтверждаются экспериментальными кривыми (рис. 95), полученными в опытах с заливкой спиральных проб. Формулы типа (1) рекомендуются для аналитического определения жидкотекучести [165].

Сказанное выше относительно влияния покрытия на жидкотекучесть справедливо для обычных кокилей. При литье фасонных деталей в облицованные кокили толщина облицовки играет меньшую роль. Из термофизических характеристик облицовки важное значение имеет коэффициент аккумуляции теплоты.

Зная температуру, при которой происходит остановка потока металла, по формуле (1) можно рассчитать путь, пройденный металлом. Можно также определить, на сколько следует увеличить перегрев чугуна для компенсации снижения начальной температуры кокиля. По опыту завода «Водоприбор», при уменьшении температуры формы на 50 град. $T_{зал}$ следует увеличить на 25 град.

Эти данные получены при производстве чугунных отливок массой 17—22 кг и массе кокиля 400 кг.

Интересные технологические исследования жидкотекучести чугуна были проведены Л. Б. Коганом и другими исследователями с помощью U-образной пробы. Металл выплавляли в вагранке производительностью 4 т/ч. Ших-

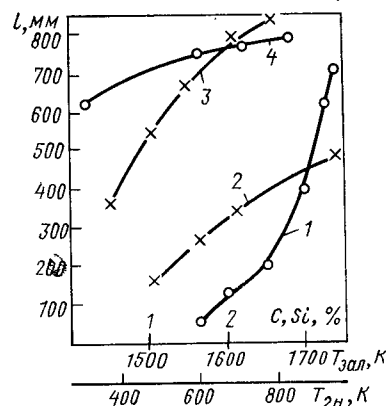


Рис. 95. Влияние содержания углерода (1) и кремния (2), начальной температуры формы (3) и температуры заливки (4) на длину l спиральной пробы

ту применяли двух составов:

Металл, полученный по шихте I, содержал 3,3—3,5% C; 2,3—2,5% Si; 0,4—0,6% Mn; 0,25—0,30% P; 0,10—0,12% S, а по шихте II: 3,6—3,8% C; 1,6—1,8% Si; 0,6—0,8% Mn; 0,06—0,12 P и 0,09—0,10 S. Чугун заливали при 1570 К. Во всех случаях жидкотекучесть чугуна, выплавленного по шихте II, была выше.

Так, если длина прутка для чугуна по первому варианту составляла 120 мм, то по второму 167 мм. Жидкотекучесть обоих чугунов оказалась одинаковой, когда температуру заливки металла II снизили до 1520—1540 К, т. е. на 30—50 град.

Линейная усадка. Это свойство чугуна зависит от его химического состава, скорости охлаждения отливки и других факторов, оказывающих влияние на фазовые превращения. Зависимость линейной усадки от содержания основных элементов чугуна иллюстрируется кривыми рис. 96 и 97. Из этих данных следует, что с увеличением содержания графитизирующих элементов усадка чугуна снижается. Элементы, препятствующие графитизации, усадку увеличивают. Связь свободной линейной усадки чугуна с его микроструктурой подтверждается данными, приведенными в табл. 21.

Как указывалось в гл. IV, общая линейная усадка сплава при литье в кокиль больше, чем при литье в песчаные формы. Это положение справедливо и для серого чугуна.

Таблица 21
Линейная усадка чугунов

Типы чугунов	Структура	Линейная усадка, %
Белый	П+Ц	1,75—1,65
Половинчатый	П+Ц+Гр	1,64—1,16
Перлитный	П+Гр	1,15—1,10
Перлито-ферритный	П+Ф+Гр	0,90—0,70
Ферритный	Ф+Гр	0,60—0,00

Для приближенного расчета линейной усадки чугунных отливок при литье в кокиль в работе [52] рекомендована формула

$$\varepsilon = 1,75 - 0,24C - 0,65C_{гр} - (a + б) \%,$$

где C и $C_{гр}$ — содержание общего углерода и графита, %; a и $б$ — параметры, зависящие от торможения усадки сопряженными элементами отливки и песчаным стержнем соответственно. Параметр a зависит от

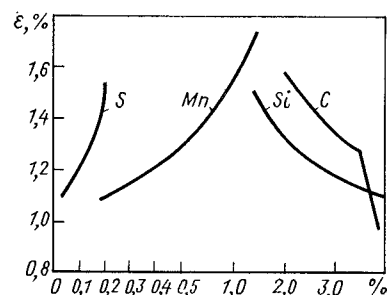


Рис. 96. Влияние химических элементов на линейную усадку чугуна

конструкции отливки и находится в пределах 0,2—0,4. Величина δ составляет обычно 0,15—0,25.

На рис. 98 показаны кривые изменения усадки чугуна по мере охлаждения. Из кривых следует, что предусадочное расширение вследствие первичной графитизации протекает в период затвердевания. Этим объясняется пониженная склонность чугунов с пластинчатым графитом к образованию в них дефектов в виде пустот усадочного происхождения: выделяющийся при затвердевании графит в большей или меньшей степени восполняет дефицит питания. Однако здесь необходимо подчеркнуть, что при литье в кокиль графитизация металла затруднена вследствие относительно высокой скорости нарастания твердой корочки.

Влияние положения чугунов на диаграмме состояния на закономерности образования в отливках усадочной пористости и раковин легко объяснить на основании теоретических положений, изложенных в гл. IV. Из условий (35) и (36) следует, что с повышением степени эвтектичности доэвтектических чугунов уменьшается склонность к образованию в отливках усадочной пористости, но увеличивается вероятность образования сосредоточенных раковин. Следует также, что условия охлаждения отливок в кокилях препятствуют появлению в чугуне рассредоточенных дефектов усадочного происхождения.

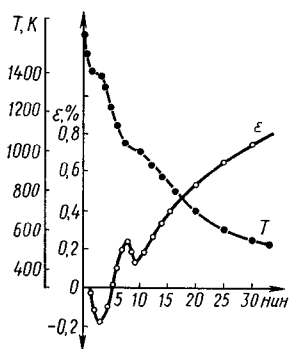


Рис. 98. Температурная зависимость свободной линейной усадки ϵ чугуна с пластинчатым графитом (Н. И. Ключнев)

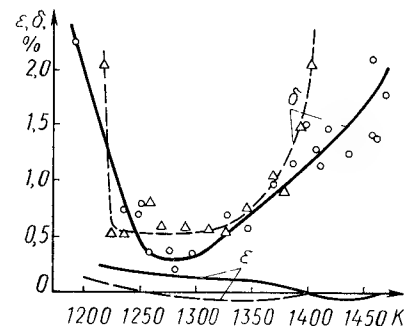
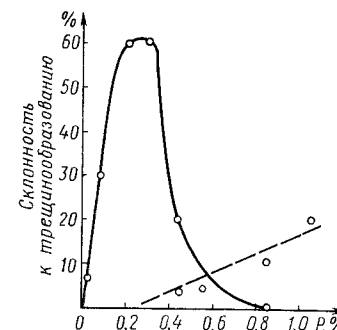


Рис. 97. Зависимость относительного удлинения δ и линейной усадки ϵ чугунов от температуры при различном содержании фосфора по данным Л. Б. Когана и И. И. Новикова:

сплошные кривые 0,2% P; штриховые — 1,1% P

Рис. 99. Зависимость показателя склонности к трещинообразованию кольцевых проб от содержания фосфора в чугуне (штриховая линия — показатель склонности к образованию холодных трещин)



В сравнении с другими распространенными литейными сплавами чугун имеет сравнительно малую линейную и объемную усадку. Благодаря этим свойствам серого чугуна литьем в кокиль получают весьма сложные по конфигурации отливки с различной массой и толщиной стенок. При этом широко используют металлические стержни и болваны.

Трещиностойчивость. С усадкой металла связаны напряженно-деформированное состояние отливки и опасность возникновения в ней трещин. В свете общих положений, изложенных в параграфе 7 гл. IV, оценка трещиностойчивости материала отливки должна заключаться в сравнении температурных зависимостей напряжений или соответствующих им деформаций с прочностью или пластичностью литого сплава.

Из производственного опыта литья в кокили известно, что с повышением содержания углерода и кремния склонность чугуна к образованию трещин заметно снижается. По данным, полученным при заливке в кокиль кольцевых проб, увеличение содержания марганца с 0,5 до 0,9% повышает трещиностойчивость чугуна; дальнейшее увеличение марганца приводит к отрицательным результатам.

Влияние фосфора на трещиностойчивость чугуна при контакте отливки с формой можно оценить по кривым рис. 97. Как видно, при повышении содержания фосфора с 0,2% до 1,1% пластичность чугуна в нижней части эффективного интервала кристаллизации (1220 K) растет, а относительное удлинение падает. Из этого следует повышение трещиностойчивости чугуна. Однако концентрация фосфора в количестве 0,2% соответствует наибольшей склонности чугуна к образованию в нем трещин (рис. 99). При $P \rightarrow 0$ трещиностойчивость также растет, что объясняется уменьшением при этом интервала кристаллизации.

Как видно из рис. 99, при $P > 0,8\%$ резко увеличивается опасность возникновения в отливках холодных трещин (штриховая линия). По мнению авторов этих данных, растрескивание кольцевых проб при комнатной температуре связано с охрупчиванием чугуна.

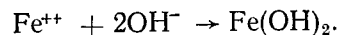
Практикой получения тонкостенных чугунных отливок в кокилях с металлическими стержнями установлено, что поверхност-

ный отбел способствует образованию усадочных трещин. Связано это, по-видимому, с очень низкой пластичностью и относительно высокой усадкой цементитной корочки. Все мероприятия, обеспечивающие получение чугуна без отбела, способствуют повышению трещиностойчивости отливок. Как показал опыт московских заводов им. Владимира Ильича и «Водоприбор», при содержании в чугуне 3,6—3,7% С и 2,4—2,7% Si (сумма не менее 6%) отливки типа подшипниковых щитов отбела не имеют, несмотря на малую толщину их стенок.

Поражаемость газовыми и неметаллическими включениями при литье чугуна в кокиль меньше, чем при литье в песчаные формы. Объясняется это тем, что в кокиле значительно меньше источников образования указанных дефектов, чем в песчаной форме. Другие же источники этих дефектов (шихтовые материалы, плавка и заливка) мало связаны с особенностями технологии литья в кокиль и поэтому здесь не рассматриваются.

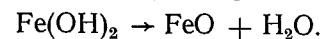
При охлаждении жидкого металла, особенно при затвердевании, растворимость газа в отливке уменьшается. Поэтому заливаемый в кокиль металл может явиться источником газовой выделенности. Мощность этого источника связана с газонасыщенностью расплава. Процесс выделения газа из металла зависит от скорости охлаждения и давления. Повышение скорости охлаждения отливки приводит к тому, что газы не успевают выделиться и остаются в растворенном (в металле) состоянии. Опыт показывает, что относительно небольшое давление 0,3 МПа (3 кгс/см²) вполне достаточно для подавления газовой выделенности. При литье чугуна, однако, основными источниками газовых дефектов являются влага, адсорбированная на поверхности кокиля, продукты окисления материала кокиля, газы, выделяющиеся вследствие разрушения покрытия кокиля, и, наконец, воздух, находящийся в объеме рабочей полости кокиля.

Железо и цементит в чугунном кокиле образуют микрогальванопару, в которой в качестве анода выступает Fe, а в качестве катода Fe₃C. Во влажной среде работа микрогальванопары заключается в следующем. Железо, теряя два электрона, превращается в катионы Fe²⁺. Поскольку адсорбированная вода, будучи слабым электролитом, при диссоциации образует ионы OH⁻, происходит следующая реакция:

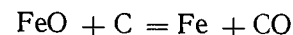


В поверхностном слое длительно работавшего кокиля было обнаружено 50% гидрозакиси железа [107]. Гидрозакись железа окисляется во влажной среде до Fe(OH)₃. Одновременно происходит восстановление ионов водорода до свободного газообразного водорода. Таким образом возникает источник насыщения чугуна водородом.

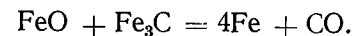
Другим источником насыщения чугуна газом является разложение Fe(OH)₂ по реакции



Закись железа, в свою очередь, реагирует по схеме



с образованием угарного газа. Кроме того, возможна реакция



Что же касается выделения газа при нагреве кокильных покрытий, то оно зависит от их состава и режима нанесения. Некоторые сведения по этому вопросу приведены в гл. VI.

Для исключения опасности образования в отливке газовых раковин из-за воздуха, находящегося в объеме рабочей полости кокиля, последний должен иметь систему вентиляционных каналов. Для расчета площади сечения этих каналов рекомендуется формула (130).

Неметаллические включения в чугун могут вноситься извне и образовываться при взаимодействии примесей и газов, находящихся в металле. При литье в кокиль борьба с растворимыми включениями облегчается: с увеличением скорости затвердевания количество примесей и их размеры уменьшаются.

Особенности микроструктуры. Повышенная скорость охлаждения отливки при литье в кокиль уменьшает степень графитизации, увеличивает количество и дисперсность перлита, измельчает графитные включения, что приводит к улучшению механических и специальных свойств серого чугуна. Однако большая скорость охлаждения и ее неравномерность по сечению отливки могут (при определенном химическом составе чугуна) привести к образованию особых структур, неодинаковых в разных слоях с необычным их чередованием в отливках. Наиболее характерно для чугунных деталей, отлитых в кокиль, — наличие отбела в результате образования структуры белого чугуна на поверхности отливки. Интенсивность теплообмена и переохлаждение способствуют выделению в структуре связанного углерода (Fe₃C), что и обуславливает образование отбела. Проблема предупреждения отбела чугунных отливок при литье в кокили — одна из наиболее важных технологических проблем, решению которой посвящены работы многих исследователей [52, 106, 107, 148 и др.]. Методы предупреждения отбела рассматриваются ниже.

Как аномальное расположение структур чугуна часто встречается следующее чередование их в отливках, полученных в кокилях: в наружном слое П + Ц, за ним — Ф + Гр, в центральной части П + Гр. При определенных условиях в наружном слое отливки может образоваться структура Ф + Гр, во внутренних

слоях — П + Гр. Образование ферритно-графитной структуры в местах повышенной скорости охлаждения на первый взгляд представляется явлением аномальным. В действительности такое явление обычно, оно обусловлено наличием дисперсного эвтектического графита (графита переохлаждения), который способствует при перлитном превращении полному распаду аустенита и выделению феррита. Наличие в структуре чугуна феррито-графитной эвтектики заметно снижает некоторые его свойства (износостойкость, прочность и т. д.). Однако в ряде случаев феррито-графитная эвтектика оказывается полезной; она улучшает обрабатываемость отливок, повышает их герметичность, а иногда и повышает их термическую выносливость. Так как условия образования феррито-графитной эвтектики еще недостаточно изучены, то управление процессом структурообразования с целью ее предупреждения или стабильности формирования представляет собой сложную проблему.

Получение при литье в кокили благоприятной структуры чугуна (включая и наличие некоторого количества цементита, устраняемого последующим отжигом отливок) гарантирует отливкам более высокие, чем в случае литья в песчаные формы, механические свойства и герметичность. Литье чугуна в кокиль повышает его свойства до уровня, сопоставимого со свойствами литой и сортовой стали, а трудоемкость получения деталей при этом снижается почти на 50% [162].

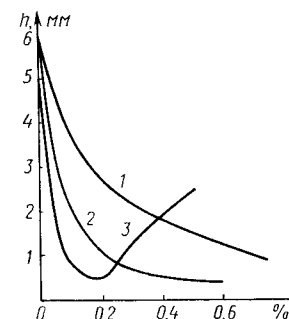
2. ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛА

Примерные составы чугунов для литья в кокиль даны в табл. 22. С целью предупреждения в отливках отбела и уменьшения склонности к трещинам чаще всего увеличивают содержание углерода и особенно кремния. Однако следует помнить, что при содержании кремния свыше 2,5% и большой скорости затвердевания в чугуне обнаруживается силикокарбидная фаза, а при содержании кремния свыше 3,2% — жидкотекучесть сплава заметно падает.

Существенное влияние на предупреждение отбела оказывает модифицирование чугуна. При модифицировании в расплаве может образовываться большое число центров кристаллизации. Некоторые модификаторы нейтрализуют влияние вредных примесей.

Широко используемые на практике модификаторы указаны в табл. 22. Кроме них применяют силикокальций и графит. При высоком содержании углерода в качестве модификатора рекомендуется ферроцерий. В указанном случае другие модификаторы вызывают появление графитовой спели. Количество модификатора обычно вводят до 0,4% от массы жидкого металла. Исключение составляет ферроцерий. Как видно из рис. 100, при

Рис. 100. Влияние модификаторов чугуна на глубину h отбела технологической пробы:
1 — алюминий; 2 — силикокальций; 3 — сплав ФЦМ-5



содержании ФЦМ-5 выше, примерно 0,2%, глубина отбела h увеличивается. На том же рисунке приведены данные о графитизирующем действии алюминия и силикокальция.

Наиболее сильное воздействие на качество чугуна оказывают комплексные модификаторы. Последние не только изменяют параметры процесса кристаллизации, но и рафинируют расплав.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при 1380 °С более половины введенного Si растворяется в чугуне; 26% идет на раскисление и 17% — на образование карбида кремния. Кальций же и церий в основном взаимодействуют с серой и кислородом, растворенным в металле. Алюминий в количестве 79% расходуется на образование окислов. Углерод в основном переходит в раствор.

Уменьшение глубины отбела при модифицировании связано с уменьшением переохлаждения сплава. Следует ожидать, что элементы, которые в большей степени уменьшают переохлаждение, окажутся более активными модификаторами, предупреждающими отбел. Целесообразно сочетать модификаторы, образующие активные зародыши и расширяющие зону критического переохлаждения [148].

Таблица 22

Химический состав (%) серого чугуна

Характеристика отливок	C	Si	Mn	P	S	Модификаторы
Тонкостенные ребристые, отжигаемые на феррит	3,6—3,7	2,1—2,3	0,4—0,5	До 0,1	До 0,05	0,1% кокска — в плавильную печь перед выдачей металла; 0,05% ФЦМ-5 — в разливочный ковш
Тонкостенные арматурные неотвественного назначения (без отбела)	3,2—3,8	2,5—3,2	До 0,8	0,4—0,6	До 0,1	—
Машиностроительные (без отбела)	3,5—3,7	2,5—2,7	0,5—0,9	До 0,6	До 0,12	—
	3,5—3,7	2,0—2,2	0,5—0,9	До 0,6	До 0,12	0,2% Al
	3,2—3,4	2,0—2,2	0,5—0,9	До 0,6	До 0,12	0,2% Al, 0,3% ФС 75

В предыдущем параграфе рассматривались аномальные структуры чугуна. При борьбе с ними следует руководствоваться следующими данными. Наиболее надежным способом получения перлитной структуры является применение специального модифицирования и легирования, в том числе и микролегирования. Весьма эффективными являются присадки в чугун сурьмы и олова, обеспечивающих получение перлитной структуры по всему сечению отливки (исследования И. П. Гладкого). Для предупреждения образования феррито-графитной эвтектики требуется присадка до 0,15% Sn. Сурьма является более эффективным перлитизатором, чем олово. Чтобы получить в чугуне перлитную структуру, достаточно 0,05—0,1% Sb, при этом не образуется междендритное строение графита. Более эффективна комплексная присадка в чугун: олово и ферроцерия одновременно.

Положительные результаты по износостойкости получены после обработки чугуна присадкой ФЦМ-5. Износостойкость чугуна с присадкой олова и сурьмы, залитого в кокиль, на 10% выше, чем износостойкость чугуна, отлитого в песчаные формы.

3. ЛИТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Различные типы литниковых систем чугунных отливок приведены на рис. 101. В практике наибольшее распространение получил верхний подвод металла. При этом стойкость кокилей в 2—3 раза выше, чем при сифонной заливке. Кроме того, обеспечивается направленное затвердевание отливок и сокращается расход металла на литники. Примеры конструкций производ-

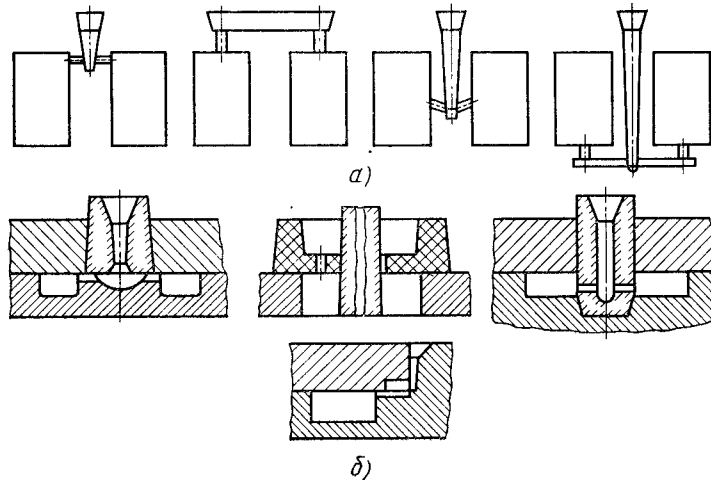


Рис. 101. Схемы литниковых систем для получения отливок из серого чугуна в кокилях с вертикальной (а) и горизонтальной (б) плоскостями разреза

ственных кокилей с верхним подводом металла показаны на рис. 69, а; 70 и 72 и с боковым — на рис. 71. Для уменьшения разбрызгивания падающего с большой высоты металла кокиль иногда наклоняют на несколько градусов.

В кокиле более всего изнашиваются зоны, образующие литниковую систему, и часть формы, на которую попадает первая порция металла. В связи с этим рекомендуется рассредоточенный подвод металла и плавное, безударное заполнение формы. Целесообразно в форме выполнять две литниковые системы для очередного использования каждой или предусматривать возможность перехода на новую. Отливки из серого чугуна получают в кокилях обычно без прибылей.

В основе расчетных формул для расчета площади сечения элементов литниковых систем лежит известное из курса гидравлики выражение, устанавливающее расход жидкости при вытекании через затопленное отверстие:

$$q = \mu F \sqrt{2gH}, \quad (134)$$

где μ — коэффициент расхода; F — площадь отверстия; g — ускорение свободного падения; H — высота уровня жидкости над центром тяжести отверстия. Если считать, что в процессе заливки H не изменяется, то, очевидно,

$$M_1 = \rho'_1 F_n t_1 \mu \sqrt{2gH}, \quad (135)$$

где M_1 — масса отливки; ρ'_1 — плотность жидкого металла; F_n — площадь сечения питателя; t_1 — продолжительность заливки. Небольшим значением величины t_1 может быть период, в течение которого температура металла при движении в полости кокиля изменяется от $T_{зал}$ до $T_{затв}$. Учитывая это из уравнения (1), полагая в нем $z = 0$ (фронт потока), находим

$$t_1 = \frac{R_c \rho'_1 c'_1}{\alpha_1 \Phi} \ln \frac{T_{зал} - T_{с.ф}}{T_{затв} - T_{с.ф}}, \quad (136)$$

где R_c — приведенный размер полости формы.

В соответствии с рассуждениями, приведенными в параграфе 2 гл. II, можно положить $\alpha_1 = \lambda_{кр}/X_{кр}$ и $T_{с.ф} = T_{2н}$. Тогда из уравнений (135) и (136) окончательно находим

$$F_n = \frac{M_1 \alpha_1}{c'_1 (\rho'_1)^2 R_c \mu \ln \frac{T_{зал} - T_{2н}}{T_{затв} - T_{2н}} \sqrt{2gH}}. \quad (137)$$

Величина F_n , найденная с помощью формулы (137), является минимальной. Поэтому требуемое сечение питателя определяется по выражению

$$F'_n = k F_n,$$

где k — коэффициент запаса, $k > 1$.

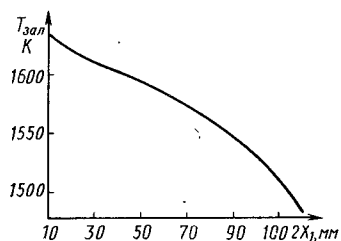


Рис. 102. График для определения $T_{\text{зал}}$ в зависимости от толщины стенки отливки $2X_1$

Для определения площади сечения других элементов литниковой системы рекомендуются следующие соотношения [52]:

$$F_{\text{п}} : F_{\text{лх}} : F_{\text{ст}} = 1 : 1,15 : 1,25,$$

где $F_{\text{лх}}$ — площадь сечения литникового хода; $F_{\text{ст}}$ — площадь сечения стояка.

В заключение рассмотрим некоторые практические данные. Для отливок из серого чугуна скорость подъема металла в кокиле должна быть не менее 10 мм/с при толщине стенки отливки до 10 мм. По опыту производства тонкостенных отливок массой 15—30 кг в кокилях с вертикальным разъемом на заводе «Водо-прибор» (г. Москва) рекомендуются питатели, рассчитанные по условию: 1 см² — на 4,5—5,0 кг массы отливки. По данным этого же завода, заполняемость формы и качество отливок заметно улучшаются применением обычного зумпфа глубиной 45 мм или шаровидного диаметром 50 мм.

Температура заливки $T_{\text{зал}}$ чугуна в кокиль находится обычно в пределах 1280—1330° С. С повышением $T_{\text{зал}}$ стойкость кокилей падает. Поэтому в исключительных случаях (для получения отливок сложной геометрической формы) $T_{\text{зал}}$ увеличивают до 1360° С. Для выбора $T_{\text{зал}}$ рекомендуется график, показанный на рис. 102.

В ряде работ выявлены многие «тонкости» влияния элементов литниковой системы на качество отливок. Так отмечается, что литниковые системы, обеспечивающие ламинарный поток чугуна при минимальной продолжительности, способствуют уменьшению отбела [171].

4. ПОДГОТОВКА КОКИЛЯ

Как видно из формул (4) и (4'), возможности управления скоростью затвердевания и, следовательно, формирования свойств отливки заложены в выборе начальной температуры кокиля, свойств и толщины покрытия формы, т. е. в осуществлении мероприятий по подготовке формы к очередной заливке.

В зависимости от химического состава чугуна цементит в отливке образуется при скоростях затвердевания 5—2 мм/с. Изменение u с 5 до 2 мм/с приводит к увеличению размеров зерен цементита с 4 до 20 мкм.

Из экспериментальных данных, приведенных на рис. 103, следует, что с повышением $T_{2н}$ вплоть до 720 К глубина отбела заметно уменьшается. При этом уменьшается также перепад

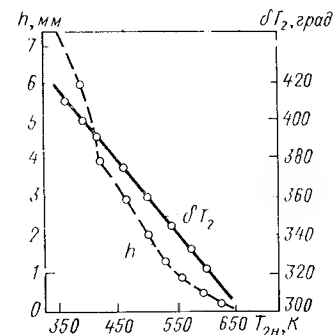


Рис. 103. Влияние начальной температуры кокиля $T_{2н}$ на глубину отбела h отливки и перепад температуры δT_2 по толщине стенки кокиля

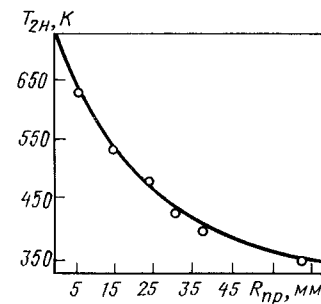


Рис. 104. График для выбора начальной температуры кокиля в зависимости от приведенной толщины стенки отливки $R_{\text{пр}}$

температур δT_2 по толщине стенки формы (расчетные данные), что является положительным фактором с точки зрения стойкости кокилей. Влияние $T_{2н}$ на жидкотекучесть и усадку металла рассматривалось ранее.

При заливке чугуна в неподогретый кокиль в отливке могут образовываться подкорковые газовые раковины. Это объясняется тем, что на поверхности холодной формы адсорбируются пары воды. Если холодный кокиль перед заливкой обтереть керосином или машинным маслом, то эти дефекты не возникают. При $T_{2н}$ более 770 К не исключено появление в отливках газовой пористости. Для выбора $T_{2н}$ в производственных условиях можно пользоваться графиком, показанным на рис. 104.

В табл. 23 приведены покрытия, рекомендуемые НИИС.Л для литья чугуна. Согласно классификации, данной в гл. VI, все они относятся к группе тонкослойных. Составы 2 и 4 предназначены для многоразового использования: наносятся в качестве подслоя 1—2 раза в смену. Составы 1, 3, 5 и 6 являются разовыми. Они могут наноситься на многоразовый подслой или непосредственно на рабочую поверхность кокиля. В практике литья в кокиль чугуна в качестве разового тонкослойного покрытия широко применяют водный раствор пасты ГБ. Состав разводят до плотности 1080—1100 кг/м³.

С помощью расчетных формул параграф 2 гл. II определяют толщину покрытия $X_{\text{кр}}$ при заданных термических условиях литья, например скорости затвердевания, длительности каждой стадии охлаждения отливки или ее элемента и др. Необходимые для вычислений значения $\lambda_{\text{кр}}$ можно принять по данным, приведенным в табл. 3 и 4 (см. гл. VI), или рассчитать по формуле (60). Экспериментальные величины $X_{\text{кр}}$ для многочисленных составов можно найти также в работах [11, 16—19, 56, 147 и др.].

Таблица 23

Составы покрытий и красок для литья чугуна, % по массе *

№ состава	Сажа ТМ-15	Огнеупор- ная глина	Молотый тапак	Молотый шамот	Апеглено- вая копоть	Марганцево- кислый калий (сверх 100%)	Бура (сверх 100%)	Жидкое стекло	Смачиватель ОП-7 или ОП-10
1	—	2	23	—	—	—	1,2	4	0,5 0,4—0,6
2	—	—	—	40	—	0,05	—	6	
3	4	4	—	—	—	0,05	—	8	
4	10—15	10—15 **	—	—	—	—	—	5—7	
5	7—10	—	—	—	—	—	—	—	
6	—	—	—	—	100	—	—	—	

* Остальное — вода.

** Содержание глинистой эмульсии плотностью 1300—1400 кг/м³.

В заключение необходимо отметить, что комплексную оценку влияния на условия формирования отливки всех факторов, связанных с подготовкой кокиля, можно дать с помощью структурных диаграмм, приведенных на рис. 12 или 51, и расчетных зависимостей гл. II. Примеры практического применения указанных диаграмм описаны в гл. III и VII.

5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Термическую обработку чугунных отливок, получаемых при литье в кокили, осуществляют для устранения отбела и феррито-графитной эвтектики, снятия внутренних напряжений и улучшения механических свойств. Наиболее часто ее применяют для устранения отбела.

Термическая обработка состоит из высокотемпературного графитизирующего отжига с нагревом до 1120—1220 К, некоторой выдержки и охлаждения вместе с печью или на воздухе. Для устранения отбела может быть осуществлена также термическая обработка отливок сразу после выбивки из формы: отливки в горячем состоянии загружают в печь, нагретую до 1220 К, выдерживают в ней 2—3 ч и охлаждают на воздухе.

В настоящее время некоторые заводы начали подвергать термической обработке отливки с целью перлитизации структуры чугуна, содержащей междендритный графит. При нагреве чугуна с междендритным графитом распад эвтектоидного цементита успевает произойти до достижения температуры $A_{с1}^n$. Процесс аустенизации протекает в металле за счет растворения углерода графита в Fe_γ . Аустенит зарождается и растет в первую очередь около включений графита. С увеличением температуры нагрева количе-

ство аустенита возрастает. Однако в интервале $A_{с1}^n—A_{с1}^k$ (1050—1100 К) превращение не завершается. Небольшие участки феррита наблюдаются в дендритах чугуна при нагреве выше $A_{с1}^k$.

Данные металлографического и высокотемпературного рентгеноструктурного анализа свидетельствуют о том, что в чугуне с междендритным графитом участки феррита сохраняются при нагреве до 1190—1200 К. Нагрев до более высоких температур (выше 1270 К) сопровождается интенсивным растворением и сфероидизацией графитовых включений. Для полного исключения структуры свободного феррита в чугуне аустенизацию необходимо проводить при более высоких температурах ($>A_{с3}$ на 120—150 град).

При одном и том же химическом составе чугуна время, необходимое для насыщения аустенита углеродом междендритного графита, в 5—8 раз меньше, чем время, необходимое для насыщения углеродом пластинчатого графита (Г. Г. Бойко). Это объясняется тем, что междендритный графит отличается чрезмерной дисперсностью и сильно развитой межфазовой поверхностью.

Наиболее высокие механические свойства у чугуна с междендритным графитом достигаются при трооститной металлической основе, которая обеспечивается закалкой с последующим отпуском при 770 К. Температура высокого отпуска чугуна с междендритным графитом не должна превышать 870 К во избежание образования ферритной металлической основы. Оптимальная температура закалки чугуна 1220—1270 К. Наибольшей износостойкостью обладают чугунные отливки с междендритным графитом после закалки и отпуска при 570—670 К. Закалка и отпуск чугуна с междендритным графитом повышает механические свойства в 1,5—2 раза и износостойкость в 3—6 раз (Г. Г. Бойко).

Снятие внутренних напряжений в отливках производится нагревом до 770—870 К, выдержкой 2—8 ч (в зависимости от конфигурации и габаритных размеров отливки) и охлаждением вместе с печью со скоростью 20—50 град/ч до 520 К.

6. ВИДЫ БРАКА И СПОСОБЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Брака отливок при литье в кокиль по сравнению с литьем в песчаные формы обычно меньше, а некоторые виды брака (возникающие при литье в песчаные формы) вовсе не наблюдаются. Однако появляется ряд специфических видов брака, связанных с большой жесткостью литейных форм и повышенной скоростью охлаждения в них отливок. Наиболее распространенные дефекты чугунных отливок — их отбел и аномальное чередование в них структур чугуна — подробно рассмотрены выше.

Специфические виды брака при литье чугуна в кокиль, причины брака и методы устранения сведены в табл. 24.

Таблица 24

Виды брака, причины и способы предупреждения

Причина брака	Способы предупреждения
<i>Несоответствие структуры</i>	
Отклонение состава металла Нарушение температурного режима плавки, модифицирования и заливки Несоответствие начальной температуры кокиля Нарушение режима нанесения на кокиль теплозащитного покрытия	Соблюдение установленных для данного технологического процесса: состава металла; режима плавки; состава, количества и режима ввода модификатора; режима заливки; начальной температуры кокиля; состава и толщины теплозащитного покрытия
<i>Газовые раковины</i>	
Подсос воздуха при заливке Повышенное газосодержание заливаемого металла Недостаточная вентиляция полости кокиля Низкая температура заливаемого металла Холодный кокиль и непросушенное теплозащитное покрытие Перегретый кокиль Сильно окисленная поверхность кокиля при значительном разгаре Повышенная газотворная способность песчаного стержня	Изменение конструкции литниковой системы с целью исключения возможности отрыва струи от поверхности формы и разбрызгивания потока при входе в рабочую полость Изменение состава шихты и повышение температуры перегрева Увеличение сечения вентиляционных отверстий и устройство дополнительных Повышение температуры заливаемого металла Подогрев кокиля, тщательное просушивание покрытия Охлаждение кокиля и в дальнейшем поддержание оптимальной частоты заливки и режима охлаждения формы Очистка кокиля, ликвидация сетки трещин (обычно путем механической обработки), нанесение на кокиль при консервации антикоррозионного покрытия Снижение газотворной способности связующего, тщательное высушивание стержня, снижение скорости заливки металла
<i>Недоливы и неспаи</i>	
Недостаточная жидкотекучесть расплава Большая протяженность литниковой системы	Повышение температуры заливаемого металла, снижение содержания серы и повышение содержания фосфора и кремния (не более 3%) Устройство коротких литниковых систем, заливка сверху

Продолжение табл. 24

Причина брака	Способы предупреждения
Ускоренное охлаждение потока расплава	Повышение начальной температуры кокиля, тщательное нанесение теплозащитного покрытия на кокиль в зоне литниковой системы
<i>Трещины</i>	
Нетехнологичность конструкции отливки Разъем кокиля по кромке отливки Местный перегрев отливки Недостаточная податливость формы Залив металла по поверхностям сопряжения частей кокиля Ускоренное и неравномерное охлаждение отливки после извлечения из кокиля	Упрощение конструкции отливки: выполняются плавные переходы, вводятся галтели, уклоны и др. Перенос разъема формы на расстояние не менее 2—3 мм от кромки отливки Рассредоточивание подвода металла Применение податливых песчаных стержней, раннее извлечение металлических стержней, раскрепление кокиля и извлечение отливки из формы Тщательная сборка формы, подгонка частей кокиля Замедление охлаждения отливки, например путем помещения ее в термостат

ЛИТЬЕ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ

1. ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА

Вязкость и поверхностное натяжение. Вязкость чугунов, независимо от их положения на диаграмме состояния, после обработки магнием и церием заметно падает. Снижение температуры расплава приводит к повышению вязкости (см. рис. 94). Вязкость растет с увеличением содержания углерода и при изотермической выдержке. Последнее обстоятельство, по мнению Н. И. Ключева, связано с удалением из расплава модификатора [66].

Обработка чугунов магнием и церием вызывает увеличение поверхностного натяжения расплава на 50—60%.

Жидкотекучесть. Данные о влиянии магния на жидкотекучесть чугуна разноречивы.

Влияние начальной температуры кокиля, температуры заливки, толщины и состава покрытия кокиля на жидкотекучесть чугуна с шаровидным графитом аналогично влиянию на жидкотекучесть чугуна с пластинчатым графитом. Количественная оценка влияния перечисленных факторов может быть осуществлена с помощью формулы (1).

Усадка. В табл. 25 приведены данные (Р. Л. Снежной, Г. В. Немченко) о свободной линейной усадке в кокилях образцов из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Как видно, увеличение диаметра образцов, а также дополнительное модифицирование металла ферросилицием приводят к уменьшению усадки. Полученные результаты вполне закономерны и объясняются увеличением степени графитизации с ростом толщины стенки отливки и с вводом графитизирующего модификатора. Сравнение данных табл. 21 и 25 показывает, что полная усадка чугуна с шаровидным графитом примерно равна усадке чугуна с пластинчатым графитом при аналогичных металлических основах (образцы диаметром 10 мм имели структуру белого, диаметром 30 мм — половинчатого и диаметром 50 мм — перлитного чугунов).

Многочисленными исследованиями установлено, что влияние химического состава и скорости охлаждения на рассматриваемое свойство не зависит от формы включений графита.

Особенность линейной усадки чугуна с шаровидным графитом заключается в 2—3 раза большей, чем у чугуна с пластинчатым графитом, величине предусадочного расширения, а также в более либо менее полной реализации последнего процесса после затвердевания (рис. 105). Вследствие этих особенностей чугун с шаровидным графитом имеет пониженную склонность к образованию горячих трещин, но повышенную склонность к образованию усадочных в основном сосредоточенных раковин и пористости (рис. 106). Графики на рис. 106 показывают, что объем усадочных

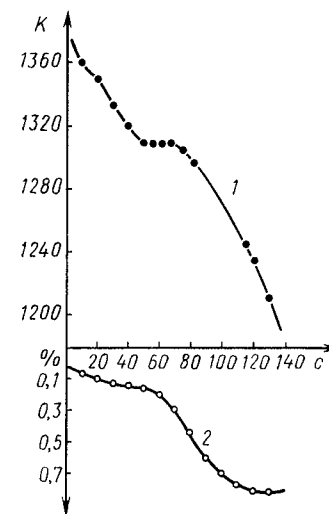


Рис. 105. Изменение температуры отливки (1) и предусадочного расширения (2) чугуна (по Н. И. Ключеву)

Таблица 25
Свободная линейная усадка чугуна

Диаметр образца, мм	Усадка, %, при модифицировании	
	магнием	магнием и ферроси- лицием
10	2,09	1,81
30	1,77	1,53
50	1,24	1,17

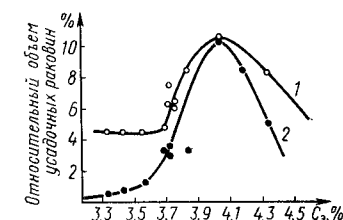


Рис. 106. Относительный объем усадочных раковин (%) в отливках:
1 — усадочные раковины и пористость; 2 — сосредоточенные усадочные раковины

раковин зависит от углеродного эквивалента и достигает максимальной величины, если состав чугуна близок к эвтектическому. Опыт показывает также, что объем усадочной раковины увеличивается при снижении $T_{\text{зал}}$. Влияние ширины интервала кристаллизации ВЧШГ на особенности усадочных процессов аналогично рассмотренному ранее для серого чугуна (см. параграф 1 гл. XI).

Трещиностойкость. Как указывалось, чугун с шаровидным графитом имеет предусадочное расширение большее, чем серый чугун, и, следовательно, меньшую склонность к образованию горячих трещин. Благодаря этому в кокилях из чугуна с шаровидным графитом получают весьма сложные отливки, т. е. такие, формирование которых протекает в условиях сильно затрудненной усадки. Сказанное подтверждается производственными примерами (см. рис. 66 и 72), а также результатами специальных исследований. При отливке образцов диаметром 10, 30 и 50 мм в кокилях, исключаяющих свободную усадку металла, было установлено (Р. Л. Снежной, Г. В. Немченко), что трещины образуются в интервалах температур 1000—970, 970—700 и 800—700 К соответственно. Следовательно, опасные с точки зрения образования трещин интервалы температур находятся ниже, чем принятые температуры удаления отливок из кокиля. Можно подчеркнуть, что

с повышением толщины стенки отливки опасность появления горячих трещин снижается.

Чугун с шаровидным графитом, однако, имеет повышенную в сравнении с серым чугуном склонность к образованию холодных трещин. Этот недостаток проявляется полнее всего при литье в кокиль, что связано с отбелом чугуна (особенно в тонких сечениях). Из других факторов, влияющих на образование холодных трещин, необходимо отметить относительно высокое значение модуля упругости и пониженную величину теплопроводности. Понятно, что эти факторы снижают трещиностойкость высокопрочного чугуна.

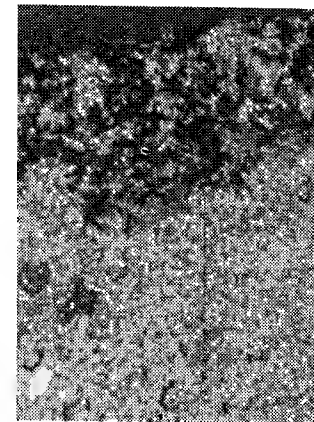
Поражаемость газовыми и неметаллическими включениями. Данные относительно поражаемости газовыми включениями серого чугуна, изложенные в предыдущей главе, имеют прямое отношение к литью чугуна с шаровидным графитом. Для отливок из чугуна с шаровидным графитом характерны также неметаллические включения, получившие название «черные пятна».

Первыми исследованиями зон отливок, пораженных черными пятнами, было обнаружено повышенное (в сравнении со средним) содержание магния (в несколько раз) и серы (в несколько десятков раз). Это послужило основанием для предположения, что черные пятна представляют собой в основном сульфиды магния (MgS), образующиеся при модифицировании. Такое предположение подтверждалось уменьшением черных пятен по данным серных отпечатков по мере снижения в чугуне содержания серы. Однако позднее, благодаря исследованиям Е. Б. Шицмана и др., было установлено, что черные пятна кроме MgS содержат MgO в виде окисных плен.

Включения сульфидов имеют более или менее компактную форму. Их образование завершается в процессе модифицирования и связано с наличием серы расплава. Обладая существенно меньшей, чем чугун, плотностью включения, MgS легко всплывают в ковше. Поэтому радикальными мерами борьбы с сульфидными включениями являются снижение содержания серы в чугуне (до 0,01%) и перевод сульфидов в шлак с помощью флюсов (криолит, плавиковый шпат и др.) с последующим скачиванием шлака. В случае, когда сульфиды попадают в форму, они располагаются обычно в верхней по заливке части отливки. При ускоренном охлаждении чугуна (например, в кокиле) соединения MgS могут быть рассредоточены по объему отливки. Они легко обнаруживаются по серным отпечаткам и характерному темно-серому цвету в изломе.

Включения окислов имеют форму тонких пленок. Эти включения, действуя подобно надразам, заметно снижают прочность, пластичность и герметичность чугуна. Окислы образуются на свободной поверхности расплава, чем и объясняется их пленочный вид,

Рис. 107. Окисные пленки в изломе отливки из чугуна, модифицированного магнием



а также возникновение как в ковше, так и при движении металла в форме. Пленки окислов при заливке потока расплава разрываются и застревают в теле отливки. Их размеры могут быть от десятых долей до нескольких миллиметров (рис. 107). С окисными пленками могут взаимодействовать включения сульфидов. В этом случае пленки обнаруживаются по серным отпечаткам. Образование плен связано с повышенной окисляемостью магниевого чугуна. Как показал Е. Б. Шицман, склонность чугуна к образованию этих включений зависит от температуры и содержания магния: чем больше магния содержится в металле, тем выше температура пленообразования. При нагреве выше этой температуры образование плен термодинамически невыгодно. Так, при содержании 0,035—0,037% Mg окисные пленки не обнаруживаются, если $T_{зал}$ выше 1690—1720 К. Из изложенного следует, что борьба с окисными пленками заключается в предотвращении окисления расплава магниевого чугуна.

К специфичным дефектам отливок из чугуна с шаровидным графитом относятся также неметаллические включения в виде ликватов графита. Располагаются они, как и прочие неметаллические включения, в верхних по заливке участках отливки. Исследованиями, проведенными в НИИСЛе, установлено, что ликвация не наблюдается, если углеродный эквивалент не превышает 4,35% для отливок с приведенной толщиной стенки 20—25 мм и 4,5% для тонкостенных (~5 мм) отливок.

Особенности микроструктуры. Из данных гл. III следует, чем больше скорость затвердевания и охлаждения чугуна, модифицированного сфероидизирующими веществами, тем правильнее шаровидная форма и меньше размеры включений графита. Поэтому при литье в кокиль создаются весьма благоприятные условия для получения чугуна с шаровидным графитом.

Как известно, основные сфероидизаторы графита — магний и церий — при их использовании в количествах, обеспечивающих получение шаровидного графита, оказывают сильное отбеливающее действие. Это обстоятельство в сочетании с ускоренным охлаждением металла приводит к тому, что отливки из чугуна с шаровидным графитом, полученные в кокилях, при толщине стенки

до 15—20 мм имеют сквозной отбел. Следовательно, термическая обработка таких отливок, за исключением особых случаев, является обязательной.

2. ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛА

Чугун с шаровидным графитом, применяемый для литья в кокили, имеет обычно следующий состав, %: 3,2—3,5 С; 2,8—3 Si; 0,6—0,9 Mn; до 0,12 Р; до 0,12 S (до модифицирования). Содержание модификаторов в металле должно находиться в пределах: 0,03—0,08% Mg и 0,02—0,05% Се. При большем содержании сфероидизаторов металл охрупчивается. Углерод следует поддерживать на верхнем пределе, так как при этом, в отличие от серого чугуна, обеспечиваются высокие механические и, кроме того, улучшаются литейные свойства. На структуру отливок из чугуна с шаровидным графитом воздействуют обычно изменением количества кремния. Однако превышение концентрации кремния сверх 3% не рекомендуется вследствие появления хрупкости.

При литье в кокиль наибольшее практическое применение нашло модифицирование чугуна металлическим магнием в камерах-автоклавах. Основные положения этой технологии разработаны в НИИСЛе и сводятся они к следующему [145]. Если содержание серы в исходном чугуне превышает 0,12%, то металл обрабатывают кальцинированной содой. Магний вводят в количестве 0,17—0,25% от массы чугуна в ковше. Модификатор представляет собой магниевый сплав в чушках марок ММ1 или ММ2 по ГОСТ 2581—78. Перед модифицированием в металл дают криолит (ГОСТ 10561—73) в количестве от 0,05 до 0,10%. Давление сжатого воздуха в камере-автоклаве устанавливают перед вводом модификатора в зависимости от температуры:

Температура чугуна в ковше, К	До 1630	1630—1650	1650—1670	1670—1690
Давление сжатого воздуха, кгс/см ² , не менее	5,0	5,6	6,4	7,3

После ввода магния металл перемешивают мешалкой, погружаемой в ковш с частотой не менее 20—30 погружений в минуту. Продолжительность этой операции зависит от количества вводимого магния и массы чугуна в ковше. Так, при количестве модификатора 0,1% и массе чугуна 250 кг длительность перемешивания составляет 20 с; с увеличением массы чугуна до 1000 кг длительность равна 35 с. При вводе 0,30% Mg указанные параметры составляют 80 и 135 с соответственно. Графитизирующие модификаторы (например, ферросилиций) вводят в расплав вместе с магнием, либо после него.

3. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Литниковые системы. Специфику литейных свойств чугуна с шаровидным графитом учитывают при выборе литниковой системы. Большинство отливок, получаемых литьем в кокили, имеют вертикальную плоскость разъема, что диктуется технологическими и экономическими соображениями (вертикальный разъем предопределяет использование конструктивно простых и удобных в обслуживании кокильных машин). Подвод металла в форму с вертикальным разъемом можно осуществлять сверху, сбоку и снизу. Возможные варианты подвода металла и конструкции литниковых систем показаны в виде схем на рис. 108. Для получения сложных отливок металл целесообразно подводить через прибыли и питающие бобышки.

Большая склонность жидкого чугуна с шаровидным графитом к образованию тугоплавких неметаллических включений требует спокойного заполнения кокиля. При такой заливке резко уменьшается окисление поверхности металла и предотвращается попадание образовавшихся включений в отливку. Кроме того, литниковая система должна быть обязательно тормозящей для обеспечения подачи в нее защитного флюса и предохранения от попадания его в форму.

Расчеты сечения питателей F_n при литье чугуна с шаровидным графитом можно выполнять по формуле (137). При этом необходимо учитывать, что коэффициент расхода μ для этого чугуна меньше, чем для серого чугуна, в 1,1—1,3 раза. Поэтому площадь

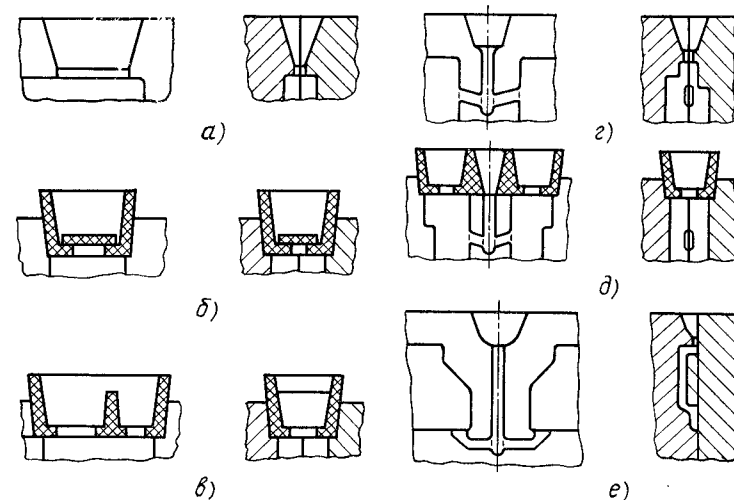


Рис. 108. Варианты подвода металла и конструкции литниковых систем: а, б, в — подвод сверху; г, д — подвод сбоку; е — подвод снизу

сечения питателей в первом случае соответственно больше, чем во втором. Для практических расчетов величины μ рекомендуется принимать по табл. 26.

Таблица 26

Значение коэффициента расхода

Внутренние полости	Подвод металла		
	снизу	сбоку	сверху
Без песчаных стержней	0,18—0,27	0,21—0,31	0,24—0,35
С песчаными стержнями	0,23—0,37	0,26—0,42	0,29—0,45

Меньшие значения μ в табл. 26 относятся к кокилям с затрудненным газоотводом.

При расчетах величины F_n для литья высокопрочного чугуна в кокиль удобно также пользоваться номограммами, позволяющими определить продолжительность заливки (рис. 109) и площади сечения питателей F_n (рис. 110) [157]. По первой номограмме продолжительность заливки находят, пользуясь последовательно шкалами M_1 , $2X_1$, γ , K_V и t . Вспомогательная шкала γ необходима для перехода от прямой $M_1 \rightarrow 2X_1$, пересекающей шкалу γ , к прямой $\gamma \rightarrow K_V$, пересекающей ее со шкалой t в точке искомой величины (индексы «св» и «сн» соответствуют подводам металла сверху и снизу).

Номограмма на рис. 110 имеет три вспомогательные шкалы γ_1 , γ_2 , γ_3 , на которых последовательно определяют точки пересечения с прямыми соответственно:

$$t \rightarrow H; \gamma_1 \rightarrow M_1; \gamma_2 \rightarrow \mu,$$

после чего по точке пересечения прямой $\gamma_3 \rightarrow \eta$ со шкалой F находят искомую площадь сечения питателей. Коэффициент K_V принимают в зависимости от величины отношения $\gamma_V = M_1/V_{габ}$ (где M_1 и $V_{габ}$ — масса и габаритный объем отливки);

γ_V , кг/м ³	0—500	500—1000	1000—1500	1500—2000	2000—2500	2500—3000	3000—3500
K_V	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Коэффициент заполняемости η определяют по зависимости

$$\eta = 0,036C_s + 0,0028T_n + 0,0013T_{2n},$$

где C_s — углеродный эквивалент ($C_s = (C + 0,31Si)\%$); T_n — температура перегрева заливаемого металла, °C; T_{2n} — начальная температура кокиля, °C.

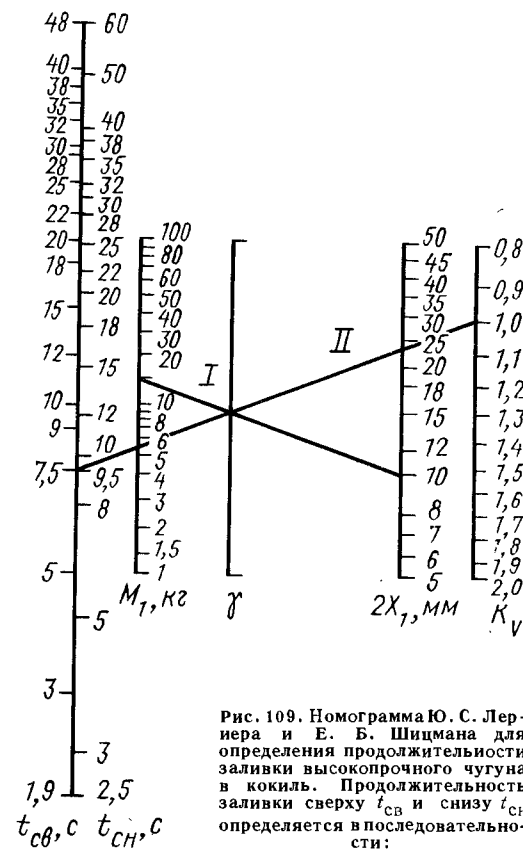


Рис. 109. Номограмма Ю. С. Лернера и Е. Б. Шницмана для определения продолжительности заливки высокопрочного чугуна в кокиль. Продолжительность заливки сверху $t_{св}$ и снизу $t_{сн}$ определяется в последовательности:

$M_1 \rightarrow 2X_1 \rightarrow \gamma \rightarrow K_V \rightarrow t$. Линиями I—II показан пример определения для отливки массой $M_1 = 15$ кг при следующих условиях: преобладающая толщина стенки $2X_1 = 10$ мм, $K_V = 1,0$

Для построения номограмм, представленных на рис. 109 и 110, использована зависимость (134) и известная эмпирическая формула для определения продолжительности заливки:

$$t_{зал} = n_1 M^{n_2},$$

где n_1 и n_2 — коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Размеры остальных элементов литниковой системы назначают из условия ее постоянного заполнения и обеспечения шлакоотделения, для чего пользуются соотношениями

$$\Sigma F_n : F_{ст} = 1,0 : 1,1,$$

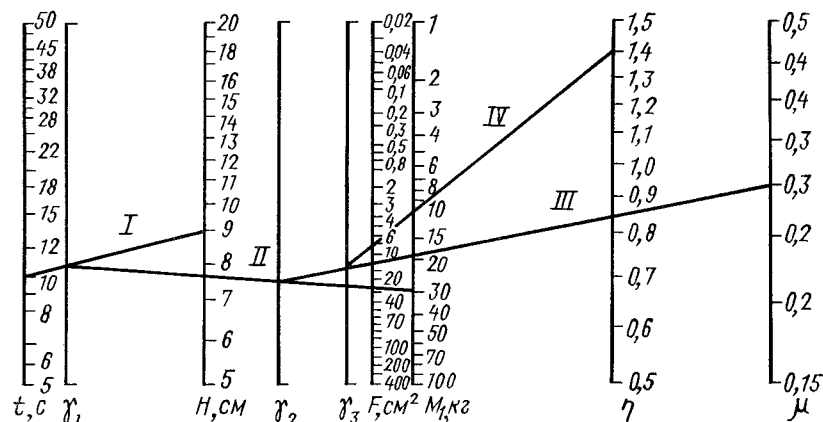


Рис. 110. Номограмма Ю. С. Лернера и Е. Б. Шицмана для определения площади сечения питателей при заливке высокопрочного чугуна. Площадь сечения питателей F_{Π} определяется в последовательности:

$t \rightarrow H \rightarrow \gamma_1 \rightarrow M_1 \rightarrow \gamma_2 \rightarrow \mu \rightarrow \gamma_3 \rightarrow \eta \rightarrow F_{\Pi}$. Линиями I—IV показан пример определения F_{Π} для отливки массой $M_1 = 30$ кг при следующих условиях: $t = 10$ с, напор $H = 9$ см, коэффициент расхода $\mu = 0,3$, $\eta = 1,4$

а при наличии шлакоуловителя

$$\sum F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1,0 : (1,2 - 1,4) : 1,1,$$

где $F_{\text{ст}}$ и $F_{\text{шл}}$ — площади поперечного сечения стояка и шлакоуловителя.

В заключение отметим, что $T_{\text{зал}}$ в кокиль чугуна с шаровидным графитом находится обычно в пределах 1570—1610 К.

Прибыли и питающие бобышки. Эти элементы рекомендуется выполнять в стержнях либо в песчаных чашах (см. рис. 108). Коэффициент тепловой аккумуляции песчаного состава, как правило, на порядок меньше, чем материала кокиля, что обеспечивает сокращение размеров и повышение эффективности работы прибылей. Конструкция и место расположения прибылей и питающих бобышек зависят от объема и конструкции теплового узла отливки. При этом в качестве исходного параметра берут диаметр окружности (D_y), вписанной в питаемый узел. Анализом питающих систем, применяемых при литье чугуна с шаровидным графитом в кокили, установлено, что выбор прибылей отливок целесообразно осуществлять, пользуясь следующими соотношениями: диаметр прибылей ($D_{\text{пр}}$) для компактных узлов отливок типа втулок, поршней $D_{\text{пр}} = 0,8D_y$; для узлов типа брусков, станин, кронштейнов и т. п. $D_{\text{пр}} = D_y$; для плоских отливок типа плит, заливаемых горизонтально, $D_{\text{пр}} = 1,2D_y$. Высоту прибыли назначают из соотношения $H_{\text{пр}} = 1,25D_{\text{пр}}$. Диаметр перешейки,

связывающего прибыль с питаемым узлом, должен быть $d = (0,3 \div 0,5) D_{\text{пр}}$.

Толщины стенок стержней, в которых выполняются питающие элементы, не должны превышать 10—20 мм.

Приведенные рекомендации позволяют выбрать размеры питающих отливку элементов в первом приближении. При желании уточнения выбранных величин следует обратиться к формулам гл. IV.

4. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Полученные в кокилях отливки из высокопрочного чугуна подлежат, как правило, термической обработке. Она необходима для ликвидации в отливках структурно-свободного цементита, получения необходимого соотношения перлита и феррита в металлической матрице, снятия внутренних напряжений и достижения в конечном итоге заданных свойств чугуна.

1. Основы теории графитизирующей термической обработки. Если представить законы изменения радиуса аустенитного двора [45] шаровидного включения $r(t)$ и скорости роста числа центров кристаллизации $n(t)$ в виде функций

$$r = K_u t^b \text{ и } n(t) = n_0 + m_1 t + m_2 t^2,$$

где K_u , n_0 , m_1 и m_2 — постоянные коэффициенты, то можно решить известное кинетическое уравнение А. Н. Колмогорова (23). Решение это имеет вид

$$\frac{V}{V_{\text{от}}} = 1 - \exp[-(K_3 + K_{\text{п}} t + K_{m_1} t^2 + K_{m_2} t^3) t^{3b}]. \quad (138)$$

Здесь V — текущий графитизированный объем отливки; $V_{\text{от}}$ — объем отливки;

$$K_3 = \frac{4}{3} \pi N_3 K_u^3, \quad K_{\text{п}} = \frac{4\pi}{3(3b+1)} n_0 K_u^3;$$

$$K_{m_1} = \frac{4\pi m_1 K_u^3}{3(3b+1)(3b+2)}; \quad K_{m_2} = \frac{8\pi m_2 K_u^3}{3(3b+1)(3b+2)(3b+3)}.$$

N_3 — число активных затравок (подложечных включений) в единице объема. При выводе формулы (138) внутренний интеграл в выражении (24) взят в пределах $0 - (t - t')$, так как начальная скорость роста зародыша не зависит от момента его появления.

Из теории кристаллизации известно, что при завершении процесса показатель экспоненты ω в выражении (138) находится в пределах 4—5,36. Поэтому, приравняв показатель экспоненты этой величине, получим формулу для расчетов продолжительности графитизирующей термической обработки t_k . Необходимые для практических расчетов значения коэффициентов приведены

Таблица 27

Результаты обработки экспериментальных данных
графитизации высокопрочных чугунов

Содержа- ние Si, %	Температу- ра отжига, К	t_K , мин	$r_{гр} \cdot 10^4$, см	$K_u \cdot 10^4$, см	$N_z \cdot 10^{-6}$, 1/см ³	$n_0 \cdot 10^{-6}$	$m_1 \cdot 10^{-6}$	$m_2 \cdot 10^{-4}$
2,61	1220	10	10	13,836	32,0832	-11,3347	4,5307	-43,052
2,61	1170	36	15	10,938	42,0809	-9,2266	1,3053	-4,2402
2,61	1120	51	12,5	7,658	28,5410	-4,6709	0,5752	-1,5392
2,11	1220	15	12,5	14,12	8,0811	7,4626	-3,4989	26,4924
2,11	1170	50	12,5	7,734	10,2329	1,4250	-0,3140	1,0399
2,11	1120	114	15	6,146	5,4645	0,4103	-0,0322	0,0420
1,78	1220	25	12,5	10,938	6,8780	5,0677	-1,2412	4,5385
1,78	1170	78	10	4,954	0,9738	7,2885	-0,6601	1,0675
1,78	1120	245	10	2,795	36,6201	1,1448	-0,0512	0,0304

в табл. 27. Найдены они способом наименьших квадратов. При этом в качестве исходных данных принимались дилатометрические кривые отжига тонких ($2X_1 = 0,006$ м) отливок из обычных чугунов.

Анализ показал, что расчетные значения ближе всего к экспериментальным при $b = 0,5$, что и следует учитывать в расчетах. Коэффициент K_u в табл. 27 определяли по формуле

$$K_u = \frac{4,375r_{гр}}{t_K^{0,5}},$$

здесь $r_{гр}$ — радиус максимального в плоскости шлифа графитного включения. Текущее значение радиуса аустенитного дворика $r(t)$ связано с радиусом графитного включения $r_{гр}$ равенством $r(t) = 2,5r_{гр}$.

Выявление конкретных числовых значений N_z , а также n_0 , m_1 и m_2 , определяющих скорость возникновения центров кристаллизации на мало активных подложках, свидетельствует о том, что графитизация осуществляется как на затравках, так и на новых центрах, возникающих по ходу процесса.

Технология термической обработки. Для обеспечения некоторой гомогенизации структуры чугуна практически длительность высокотемпературного отжига в 1,5—2 раза превышает длительность собственно процесса графитизации.

После высокотемпературного графитизирующего отжига, с целью получения высоких пластических свойств чугуна с шаровидным графитом, чаще всего проводят вторую стадию отжига, заключающуюся в выдержке тонкостенных отливок при 950—1030 К

в течение 1,5—2 ч с охлаждением на воздухе или в воде (последнее для быстрого прохождения интервала отпускной хрупкости). В результате двухстадийного отжига в структуре отливок содержится не менее 90% феррита. Достижение 100% феррита, как правило, требует значительного увеличения общего времени выдержки отливок, особенно при наличии в чугуне небольшого количества хрома. При этом пластические характеристики чугуна повышаются незначительно.

Нормализацию кокильных отливок из чугуна с шаровидным графитом применяют для получения перлитной структуры металла. Такая структура обеспечивает высокую прочность и износостойкость деталей. Часто нормализацию проводят путем ускоренного охлаждения отливок (на воздухе) непосредственно после высокотемпературного отжига.

Однако и при отсутствии отбела отливки также подвергают нормализации: нагревают до 1170—1220 К и выдерживают при этой температуре от 1 до 3 ч в зависимости от температуры нагрева, структуры, химического состава чугуна и толщины стенок отливок, а затем охлаждают на воздухе. Опыт повторной нормализации показывает, что такая термообработка положительно влияет на прочностные, пластические свойства и усталостную прочность чугуна.

Практически для всех кокильных отливок из чугуна с шаровидным графитом рекомендуется проводить отпуск для снятия внутренних напряжений. При отпуске выбирают температурные интервалы, в которых исключается возможность структурных превращений и одновременно обеспечивается максимальная релаксация напряжений. Отпуск ведут при 820—920 К. Продолжительность выдержки зависит от сложности конфигурации отливки и от необходимой степени снижения внутренних напряжений. Так, при 770 К за 1 ч выдержки напряжения в отливке средней сложности снижаются примерно на 50%, за 7 ч — на 75%, а за 15 ч — на 79%. При 870 К за 1 ч выдержки напряжения могут снизиться на 84% и за 7 ч — на 96%.

Описанные режимы термической обработки позволяют получать в кокилях отливки из чугунов марок ВЧ 45—5, ВЧ 50—2, ВЧ 60—2 и ВЧ 70—3 (чугун последней марки достигается обычно при повторной нормализации).

Сочетание особо высоких механических свойств кокильных отливок из высокопрочного чугуна с высокой пластичностью достигается при изотермической закалке с температуры аустенитного либо аустенито-ферритного состояния. Нагрев перед закалкой должен производиться до 1100 К (кремний повышает и расширяет область существования одновременно α - и γ -фаз); выдержка отливок при этой температуре составляет 2,0—2,5 ч; охлаждение осуществляется в жидких средах при 600—620 К.

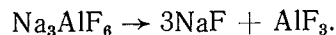
После изотермической закалки образуется троосто-ферритная металлическая основа и значения $\sigma_{\text{в}}$ повышаются до 90 кгс/мм² при относительно низкой твердости (НВ 229—277) и хорошей обрабатываемости. Наиболее высокие показатели прочности (до 125 кгс/мм² при твердости НВ 363—402) можно получить, проводя изотермическую закалку тонкостенных отливок с температуры 1170—1190 К в жидкой среде с температурой 570—590 К.

5. ВИДЫ БРАКА И СПОСОБЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Для отливок из чугуна с шаровидным графитом, получаемых в кокилях с тонкослойным покрытием, характерны те же виды брака, что и для отливок из серого чугуна (см. параграф 6 гл. XI). В то же время ряд дефектов характерен только для отливок из высокопрочного чугуна. Прежде всего следует указать на черные пятна. Задача борьбы с черными пятнами в виде окисных плен относится к числу наиболее важных. Установлено [158], что такие включения, занимающие 2,0—2,5% площади сечения образцов, снижают прочностные свойства чугуна на 20, а пластические — на 50%.

Описанный в параграфе 1 настоящей главы механизм возникновения плен подсказывает необходимость защиты жидкого чугуна от окисления непосредственно в форме. Такая защита исключительно эффективна и надежно осуществляется легко растворяющим окислы магния и другие неметаллические соединения криолитом. Его рекомендуется вводить в форму в количестве 0,01—0,05% от массы расплава.

Положительное действие криолита, кроме способности его растворять окислы, объясняется еще и тем, что он разлагается на фториды алюминия и натрия:



Газообразный фторид алюминия вытесняет воздух из формы и уменьшает окислительный потенциал газовой среды. NaF из-за меньшей в термодинамическом отношении устойчивости по сравнению с солями магния приводит к обеднению поверхности чугуна магнием и этим уменьшает его склонность к окислению.

Что же касается неметаллических включений в виде графита, то меры борьбы с ними описаны в параграфе 1 настоящей главы.

ЛИТЬЕ КОВКОГО ЧУГУНА

1. ОСОБЕННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА

Белый чугун, являющийся исходным материалом для получения ковкого чугуна, имеет худшие, по сравнению с серым чугуном, литейные свойства, более низкую жидкотекучесть, большую, примерно в 2 раза, линейную (см. табл. 21) и объемную усадку, повышенную склонность к образованию трещин. Это и определяет особенности и трудности литья ковкого чугуна в кокиль.

Своеобразие процесса получения ковкого чугуна обусловило преимущественное его использование для тонкостенных отливок сложной конфигурации, порой даже ажурных, незначительной массы. Большую часть таких конструкций относят к нетехнологичным для условий литья в кокиль. С увеличением скорости затвердевания таких отливок, что неизбежно с применением кокилей, становится более вероятным появление недоливов и трещин. Ковкий чугун заливают в форму при более высокой температуре, чем серый чугун, что вызывает дополнительные заботы литейщиков о стойкости кокилей. Все сказанное относится к отрицательным факторам, затрудняющим применение кокилей для ковкого чугуна.

Литье в кокиль ковкого чугуна имеет и ряд достоинств. Как известно, непременным условием изготовления качественных отливок из ковкого чугуна является отсутствие в его литой структуре свободного углерода. Этим, в основном, и обусловлена необходимость низкого содержания в металле элементов-графитизаторов (C и Si), а также небольшой толщины стенок отливок. Так как затвердевание отливки в кокиле идет значительно быстрее, чем в песчаной форме, при литье в кокиль менее вероятно появление графита в литой структуре чугуна, что позволяет изготавливать из ковкого чугуна более массивные отливки и повышать содержание в металле суммы углерода и кремния [179]. Последнее благоприятно сказывается не только на литейных свойствах чугуна, но и позволяет применить специальные добавки, упрощающие его графитизирующий отжиг и улучшающие механические свойства. Все это расширяет номенклатуру отливок, которые целесообразно изготавливать из ковкого чугуна. Измельчение структуры белого чугуна при литье в кокиль способствует сокращению продолжительности отжига и повышению свойств ковкого чугуна.

В допустимых случаях при литье в кокиль можно получить специальные отливки со структурой ковкого чугуна на поверхности и серого — в средней части (рис. 111). Технологический процесс производства таких отливок проще, чем из обычного ковкого чугуна, и, в то же время, поверхностные слои деталей обладают повышенными плотностью, прочностью, износостойкостью. Подобные отливки можно использовать для ряда деталей машин,

К центру отливки

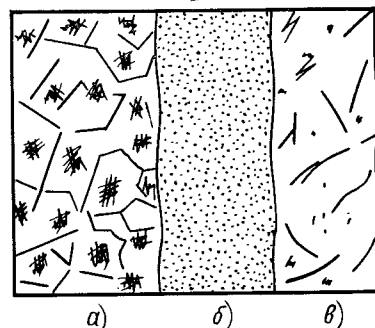


Рис. 111. Схема расположения структур чугуна в отожженных отливках, имевших отбел:

а — наружный слой (ковкий чугун); б — промежуточный участок (серый чугун с феррито-графитной эвтектикой); в — внутренняя область (серый чугун)

а также в качестве заготовок для кокилей с литой рабочей поверхностью. Они имеют повышенную прочность при термической усталости и в меньшей степени, чем серые чугуны, подвержены разрушению из-за газовой коррозии и т. п.

Из приведенных в табл. 28 данных [70] видно, что при использовании чугуна одного и того же состава металл отливок, полученных в кокилях, имеет более высокие свойства, чем при литье в песчаные формы (отливки отжигали по одинаковому режиму).

Опыт некоторых зарубежных заводов [172, 185] показывает, что литье ковкого чугуна в кокиль может быть осуществлено с достаточно большой эффективностью. В Чехословакии, например, отливают детали типа фланцев габаритных размеров 210×130 мм в водоохлаждаемых кокилях. При этом уже после 30 заливок экономически оправдываются затраты на кокиль, отходы снижаются с 46 до 15%. Заметно сокращается цикл отжига вследствие повышения степени эвтектичности чугуна. Однако следует помнить, что

Таблица 28

Химический состав (%) и механические свойства ковкого чугуна

Марка чугуна	C	Si	Mn	P	S	Литье в песчаные формы			Литье в кокиль		
						σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	НВ
КЧ 30-6	2,0—3,1	1,7—1,83	0,58—0,83	0,07	0,17—0,20	30	6	103	35	7,5	111
КЧ 33-8	2,45—2,7	1,02—1,3	0,42—0,73	0,07	0,17—0,20	37	12	111	40	15	111

литье ковкого чугуна в кокиль экономически целесообразно только при высоком уровне механизации процесса, так как в настоящее время отливки из ковкого чугуна изготавливают в обычных песчаных формах в цехах массового высокomeханизированного производства с высокой технологической культурой (на автомобильных заводах, заводах сельхозмашиностроения и др.).

2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ОТЛИВОК

Особенности свойств ковкого чугуна не всегда позволяют использовать кокили для получения отливок, предназначенных для литья в песчаные формы. Только в редких случаях такие отливки оказываются технологичными для нового процесса. Лишь для наиболее простых и массивных из них можно успешно применить кокили. Во всех других случаях при переходе с литья в песчаные формы на литье в кокили необходимо создавать более технологичные конструкции отливок, приспособляя их к условиям литья в кокиль. При этом следует учитывать рекомендации параграфа 1 гл. VIII наряду с известными положениями создания технологичных литых конструкций из ковкого чугуна для литья в песчаную форму.

Прежде всего задача заключается в создании податливой, не склонной к образованию трещин литой конструкции. Для этого между элементами отливки необходимо делать плавные переходы, устраивать в них упрочняющие ребра и избегать разностенность. Учитывая пониженную жидкотекучесть белого чугуна, для предупреждения недоливов и неспаев в отливках следует избегать в конструкциях очень тонких элементов, особенно большой протяженности и с развитой поверхностью. Более того, утолщенные отливки для литья в кокили являются более приемлемыми, чем для литья в песчаные формы, так как в первом случае возникает меньшая опасность выделения свободного графита. При литье в кокиль более массивных отливок не только улучшается заполняемость форм жидким металлом, но и увеличивается трещиностойкость отливок.

3. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Особенности устройства литниково-питающих систем для отливок из ковкого чугуна — короткие литниковые каналы и питающие бобышки — объясняются повышенной (в сравнении с серым чугуном) усадкой и пониженной жидкотекучестью расплава. Их принципиальная схема при литье в кокиль такова же, как при литье в песчаные формы. Одинаковой остается и методика расчета элементов литниково-питающих систем. Однако особенности литья в кокиль позволяют, а иногда и требуют принятия новых рацио-

нальных решений. Такие решения должны основываться на особенностях формирования отливок в кокиле. Существо этих решений в следующем: использование питателей с увеличенным поперечным сечением; обеспечение направленного затвердевания путем тепловой изоляции питающих бобышек; уменьшение размеров бобышек вследствие повышения в чугуне содержания углерода и кремния; применение литниковых систем без элементов шлакоулавливания; исключение в особых случаях (при горизонтальном расположении отливок в кокиле и небольшой массе питаемых узлов) питающих бобышек и организация питания за счет утолщенного стояка.

Так как при литье в кокиль отпадает необходимость устройства шлакоуловителей, стояк в форме можно устанавливать непосредственно над бобышкой. Ввиду большой скорости кристаллизации металла в кокиле необходимо обеспечивать утепление питающей бобышки и питателей. С этой целью используют облицовку их рабочих полостей; особенно целесообразны многократно используемые облицовки.

С успехом применяют песчаные стержни-вставки, в которых выполняется литниковая система. При горизонтальном разрезе кокиля в песчаной вставке располагается вся литниковая система (рис. 112, а); вертикальный разъем позволяет ограничиваться стержнем, в котором размещается только бобышка и питатели (рис. 112, б). В последнем случае металл может быть подведен сверху или сбоку бобышки. Следует иметь в виду, что вертикальное расположение отливки в кокиле обуславливает необходимость обязательного устройства питающих бобышек.

В некоторых случаях целесообразно отступать от традиционной схемы литниковой системы для лучшего питания отливки. Так, например, в работе [70] описан процесс литья пустотелой гайки в кокиль, в котором металл подво-

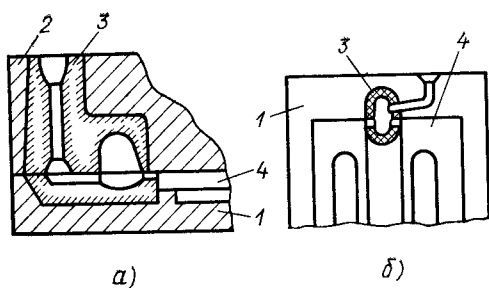


Рис. 112. Литниково-питающие системы при горизонтальном (а) и вертикальном (б) разрезах кокиля: 1, 2 — половинки кокиля; 3 — стержень-вставка; 4 — литейные полости

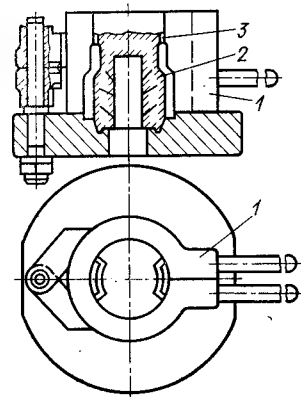


Рис. 113. Кокиль для пустотелой гайки из ковкого чугуна: 1 — кокиль; 2 — песчаный стержень; 3 — дождевые питатели

дился из прибыльной полости через дождевые питатели (рис. 113). Форма имеет вертикальный разъем.

4. РЕЖИМ ОТЖИГА И УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ

Термическая обработка отливок из белого чугуна для получения ковкого чугуна состоит в графитизирующем отжиге. Литье в кокили не вносит принципиальных изменений в режим отжига, но позволяет внести некоторую рационализацию последнего. Так как при литье в кокиль создаются благоприятные условия для ускорения процесса графитизации, представляется возможность сократить продолжительность отжига и изменить его температуру.

В свете общих положений теории кристаллизации сплавов, изложенной в гл. III, и основ теории графитизирующего отжига чугуна, приведенной в гл. XII, ясно, что в металле кокильных отливок из ковкого чугуна наблюдаются более мелкие карбиды (рис. 114), а процесс графитизации ускоряется. Облегчению распада цементита способствует повышенное содержание в металле кремния; с увеличением последнего уменьшаются размеры $d_{\max}$ и увеличивается количество n выделений углерода отжига (рис. 115). Однако необходимость получения в отливках структуры белого чугуна вынуждает при литье в песчаные формы использовать металл с уменьшенным количеством углерода (2,2—2,9%) и кремния (до 1,3%). Более того, в отливках со стенками толщиной свыше 15 мм почти невозможно получить сквозной отбел даже при очень низкой сумме углерода и кремния. При литье в кокиль отливок со стенками толщиной до 15 мм содержание углерода может быть повышено до 3% и кремния до 4%.

Кокильное литье, обеспечивая большую степень переохлаждения сплава при кристаллизации, позволяет без опасности образования отсера в отливках вводить в металл графитизирующие

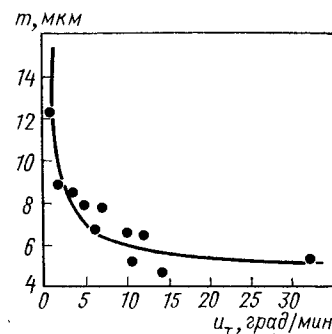


Рис. 114. Влияние скорости охлаждения на величину карбидов m белого чугуна

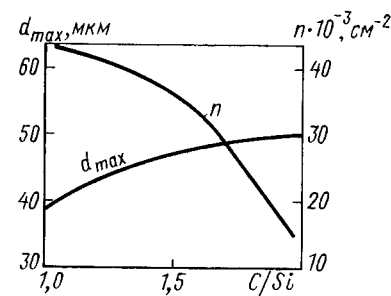


Рис. 115. Зависимость размера $d_{\max}$ и количества n графитных включений от отношения C/Si при $C = 2,4-2,6\%$

модификаторы, которые резко увеличивают метастабильность цементита и ускоряют процесс графитизации при отжиге.

Таблица 29

Влияние хрома на механические свойства ковкого чугуна

Сг, %	σ_B , кгс/мм ²	δ , %
0,15	35—40	10—15
0,15—0,20	40—50	8—12
0,20—0,35	50—70	5—10

личить содержание хрома [186] и улучшить механические свойства ковкого чугуна. Влияние хрома наглядно видно из данных, приведенных в табл. 29.

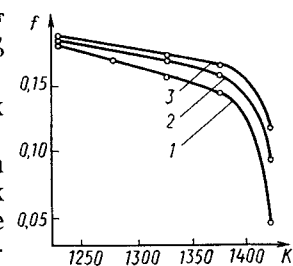
5. ВИДЫ БРАКА И СПОСОБЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Одной из причин, сдерживающих распространение литья ковкого чугуна в кокиль, следует считать необходимость выдерживать ряд технологических параметров в весьма узких пределах. Изменение некоторых параметров (начальной температуры кокиля, химического состава чугуна, выдержки отливки в кокиле, характера покрытия кокилей и др.), оказывая благоприятное влияние на предупреждение одного вида брака, создают одновременно условия для появления другого вида брака. Например, повышение T_{2n} положительно сказывается на предупреждении трещин и недоливов в отливках, но способствует графитизации при затвердевании. Такое же влияние оказывает и усиление теплоизолирующего действия покрытия. Поэтому технолог должен хорошо представлять причины каждого вида брака, чтобы в конкретных условиях находить оптимальные решения.

При литье ковкого чугуна в кокиль наиболее распространенными видами брака отливок являются горячие и холодные трещины, несоответствие требованиям литой структуры, недоливы, неспай, усадочные раковины и пористость.

Трещины возникают, как правило, из-за стесненной усадки и неравномерного затвердевания разных узлов отливки. Чем большая поверхность отливки формируется металлической частью кокиля, тем легче управлять структурообразованием белого чугуна. Наличие частей формы с разной теплоаккумулирующей способностью сужает пределы химического состава металла, что создает трудности производства. С этой точки зрения применение металлических стержней взамен песчаных весьма целесообразно, но оно связано с большей вероятностью образования трещин в отливках. Предупредить этот дефект можно окрашиванием

Рис. 116. Влияние температуры отливки на коэффициент трения f при покрытии кокиля машинным маслом (1), ацетиленовой копотью (2) и смесью маршала, жидкого стекла и воды (3)



стержней, своевременным извлечением их из отливки.

При литье ковкого чугуна не всегда возможно предупредить трещины отливок утолщением слоя краски, большое значение имеет трение между отливкой и кокилями. В работе [35] исследовалось влияние вида покрытия на коэффициент трения между отливкой и кокилем (металлическим стержнем). Доказано, что самый высокий коэффициент трения дает краска на маршалите, жидком стекле и воде (рис. 116, кривая 3). Чем более шероховато и прочнее покрытие, тем лучше оно предупреждает трещины отливок, так как уменьшает концентрацию деформации в тепловых узлах (см. гл. IV.)

Уменьшению трещин способствуют подогрев кокиля, увеличение выдержки в нем отливки. Так, например, в работе [70] указывается, что брак отливок по трещинам составлял 76% и лишь увеличение выдержки их в кокиле с 20—30 с до 10 мин позволило сократить брак до 10%. Уменьшается опасность образования трещин также при увеличении степени эвтектичности чугуна.

Недоливы и неспай обусловлены медленной заливкой и недостаточным нагревом кокиля, низкой температурой заливки и неблагоприятным химическим составом чугуна. Для предупреждения этого вида брака целесообразно прежде всего применять меры, которые не могут повлиять на увеличение других видов брака. Главная из них — очистка чугунов от вредных примесей, перегрев его и ускоренная заливка. Повышение степени эвтектичности чугуна может привести к улучшению жидкотекучести и предупреждению недоливов, но оно связано с опасностью графитизации чугуна во время кристаллизации, что обязательно следует учитывать. Эффективную меру предупреждения недоливов — повышение T_{2n} — следует использовать, с учетом влияния ее на графитизацию чугуна при кристаллизации.

Усадочные раковины и пористость целесообразнее предупреждать совершенствованием устройства литниково-питающей системы, изменением теплового состояния отдельных частей кокиля (например, локальным охлаждением или обогревом) и в последнюю очередь — изменением химического состава металла.

Газовые раковины в отливках из ковкого чугуна имеют ту же природу, что и газовые раковины в отливках из серого чугуна, следовательно, и меры их предупреждения одинаковы: очистка кокилей, подбор качественных покрытий, хорошая просушка покрытий, вентиляция кокилей. Механизм образования газовых раковин при литье чугуна рассмотрен в гл. XI.

1. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА И СВОЙСТВА СТАЛИ

Особенности литья стали в кокиль заключаются в ее более высоких (в сравнении с другими распространенными литейными сплавами) значениях температуры кристаллизации и величины усадки. С повышением температуры заливки металла резко интенсифицируются все процессы, связанные со стойкостью кокиля (см. гл. V). Поэтому проблема стойкости кокилей при литье стали стоит чрезвычайно остро.

Согласно отечественному опыту и зарубежным данным [174], в настоящее время наиболее распространенным материалом для кокилей при литье стали остается серый чугун. Кокили из серого чугуна имеют стойкость, измеряемую десятками и в отдельных случаях несколькими сотнями заливок.

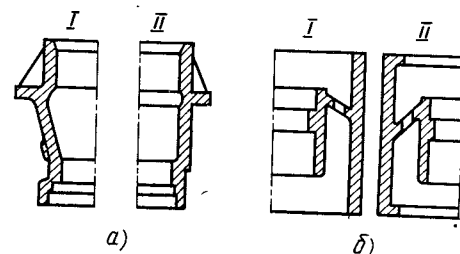
В связи с повышенной усадкой стали появляется большая опасность возникновения в отливках значительных остаточных напряжений, горячих и холодных трещин. С этим же связана необходимость обеспечения условий четко выраженной направленности затвердевания. Эти особенности существенно ограничивают возможность литья стали в кокиль. Они же определяют область рационального применения процесса. В кокилях целесообразно получать стальные детали наиболее простой конфигурации — с плавными наружными очертаниями и равностенные. Не случайно поэтому, что в них чаще всего отливают стальные детали типа тел вращения. При такой конфигурации рабочей полости формы изготовление кокиля оказывается наиболее простым.

Таким образом, обеспечение технологичности стальных отливок является задачей первостепенной важности. Здесь уместно сослаться на рекомендации по проектированию литых конструкций, изложенные в параграфе I гл. VIII. Примеры нетехнологичных и технологичных конструкций стальных деталей представлены на рис. 117.

Пример переработки конструкции отливки описан в работе [90] по опыту освоения технологии литья заготовок для получения вагонных колес прокаткой. Литую заготовку (рис. 118, а) изготовляли в кокиле, который заливали через прибыльную часть. В диске отливки из-за нарушения направленности затвердевания возникали усадочные раковины. Направленное затвердевание было достигнуто после применения песчаного стержня для формирования тонкого перехода от ступицы к диску. Однако при этом снижалась эффективность процесса, увеличивалась опасность повышения брака из-за засоров.

Задача была решена путем повышения технологичности отливки. Незначительные изменения конструкции заготовки

Рис. 117. Нетехнологичные (I) и технологичные (II) конструкции ступицы (а) и катка (б)



(рис. 118, б) позволили разработать рациональную технологию их литья в кокиль (рис. 118, в). По данным авторов работы [90], такая технология позволяет получить здоровые заготовки с равномерными свойствами стали во всех сечениях. Кроме того, свойства стали заготовок более высокие, чем свойства стали отрезных заготовок из слитков.

Отметим, что материалы настоящей главы относятся только к литью стали в кокиль с тонкослойным покрытием. Технология литья в облицованные кокили рассмотрена в главе XVIII.

Свойства стали. Основные закономерности изменения структуры и свойств литой стали при увеличении скорости затвердевания рассмотрены в гл. III. Здесь же приведены примеры из практики литья в кокиль.

Рис. 119 дает представление о благоприятном влиянии кокилей на важнейшие механические свойства стали. Аналогичны результаты исследований влияния кокилей и на свойства других сталей. Например, в стали 110Г13Л при переходе от литья в песчаные формы на литье в кокиль ударная вязкость и износостойкость повышаются на 20—50%, а аустенитное зерно заметно размельчается.

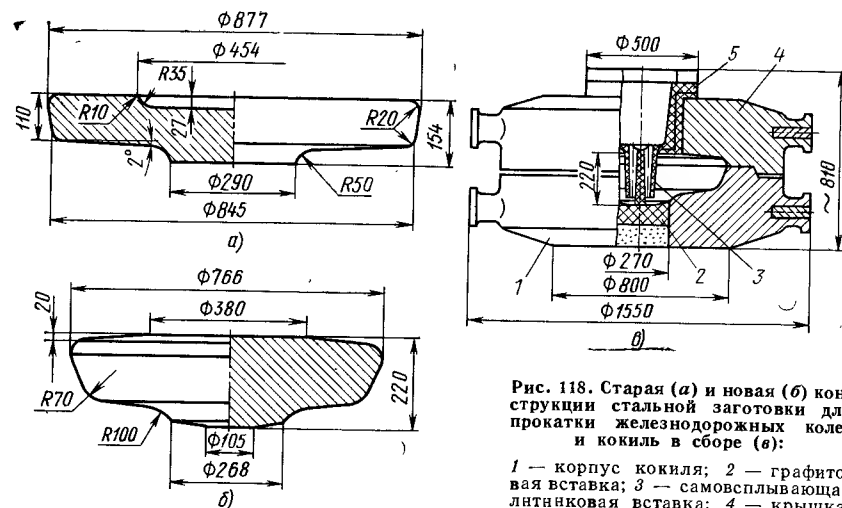


Рис. 118. Старая (а) и новая (б) конструкции стальной заготовки для прокатки железнодорожных колес и кокиль в сборе (в):
1 — корпус кокиля; 2 — графитовая вставка; 3 — самовсплывающая литейная вставка; 4 — крышка; 5 — стержень прибылы

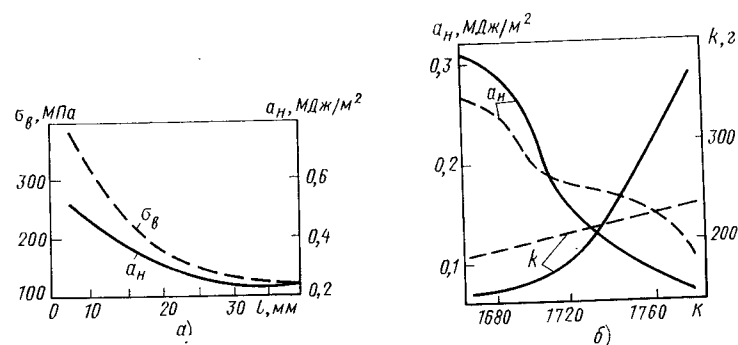


Рис. 119. Зависимость σ_B и σ_H стали 32X06 от расстояния l образца до стенки кокиля (а); a_H и износа k стали 110Г13Л от материала формы и температуры заливки (б): сплошные линии — литье в кокиль, штриховые — литье в песчаную форму

О значительном улучшении свойств стали 110Г13Л (повышении плотности отливок, размельчении дендритов в структуре, увеличении ударной вязкости) в связи с ускорением затвердевания отливок указывается в работе [156].

Однако известны и другие данные. В. П. Ксенофонов, например, исследовал одновременное влияние материала формы и температуры заливки на структуру и свойства стали 110Г13Л [80] и установил, что кокиль обеспечивает получение более высоких значений ударной вязкости только в том случае, когда температура заливки не превышает 1700 К (рис. 119, б). Износостойкость отливок, полученных в кокилях, оказывается более высокой при $T_{зал}$ не выше 1720 К.

Залитая в кокиль сталь более восприимчива к модифицированию, микролегированию и экономному легированию, чем сталь, залитая в песчаные формы. В работе [139] описан опыт присадки титана и других элементов в виде порошка непосредственно в литниковую чашу кокиля. Модифицированную титаном (0,074Ti) сталь 35Л использовали для роликов конвейера разливочной машины. Прочность стали увеличилась примерно на 15%, а износостойкость — почти в 3 раза.

2. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ И ЗАЛИВКА

Особенности литейных свойств стали требуют иного, чем для других сплавов, устройства литниково-питающих систем. Высокая температура заливки, большая усадка при затвердевании, низкая жидкотекучесть, повышенная склонность к трещинообразованию и другие свойства обусловили особые требования к устройству литниково-питающих систем кокилей стальных отливок. На основании этих требований предпочтение отдается следующим

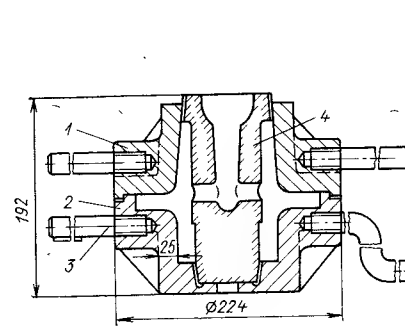


Рис. 120. Кокиль для ступицы: 1 — крышка кокиля; 2 — корпус кокиля; 3 — ручки; 4 — стержень

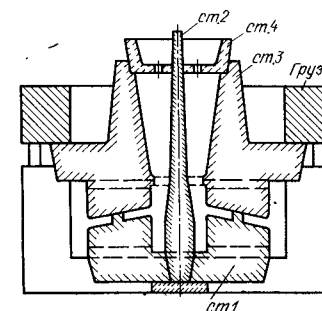


Рис. 121. Кокиль для стальных колес: 1 — крышка кокиля; 2 — корпус кокиля; 3 — ручки; 4 — стержень

технологическим и конструктивным решениям: 1) выполнению полости прибылей только в песчаных вставках или в частях кокиля с хорошей тепловой изоляцией; 2) заливке кокилей сверху, преимущественно через прибыли; 3) совмещению (для мелких деталей) прибыли и стояка литниковой системы; 4) исключению попадания струи жидкой стали на рабочие поверхности кокиля; 5) максимальному сокращению пути движения расплава до попадания его в литейную полость; 6) заливке возможно большего числа мелких литейных полостей через единую литниковую систему и др.

Примеры практической реализации первых двух решений показаны на рис. 120 [2] и 121 [111] соответственно. Если нет возможности выполнить литниковые каналы в песчаных вставках, металлические каналы должны быть хорошо защищены. С целью защиты кокилей в местах подвода металла может быть использовано покрытие, состоящее, % по массе, из 80—85 графитового порошка; 10—15 пека; 5—10 смолы.

Заливка сталью небольших кокилей связана с некоторыми трудностями и потерей жидкого металла. Использование в этом случае стопорных ковшей неудобно (затруднена точная дозировка металла), а заливка из небольших чайниковых ковшей связана с потерей температуры жидкой стали. Тем не менее предпочтительней заливать такие кокили не из стопорных, а из чайниковых (с глубокими перегородками) ковшей.

Оправдало себя на практике использование наборных небольших кокилей, расположенных на плите, перекрытых объединяющим стержнем, в котором выполняется общая литниковая система.

3. ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИИ

Многие параметры технологии (начальная температура кокиля, температура заливки, состав и толщина покрытия, продолжительность охлаждения отливки в форме и др.) могут быть найдены рас-

четным путем на основе расчетного аппарата, который приведен в первом разделе. В более сложных случаях (например, комбинированная форма — кокиль и песчаный стержень) следует обращаться к специальной литературе [5, 6, 16, 20, 21, 48, 49 и др.]. Понятно, однако, что при выборе вариантов технологии необходимо отталкиваться от практического опыта.

Практика показывает, что при литье стали начальная температура кокиля $T_{2н}$ не должна, как правило, превышать 520 К. При больших значениях $T_{2н}$ увеличивается опасность перегрева кокиля и, следовательно, понижается его стойкость. По этой же причине $T_{3эл}$ стали должна быть минимальной. Лишь одно условие — возможность возникновения недоливов и неспаев в отливках — служит оправданием заливки кокилей перегретой сталью. Оптимальной для углеродистых сталей считается $T_{3эл} = 1720 \div 1770$ К.

При производстве отливок в кокилях обработке стали в плавильной печи необходимо уделять особое внимание. Недопустимо использование стали с повышенной газонасыщенностью, загрязненной большим количеством неметаллических включений, значительно снижающих жидкотекучесть и увеличивающих опасность возникновения неспаев, усадочно-газовых раковин и т. п.

Продолжительность пребывания стальной отливки в форме является важнейшим фактором стойкости кокиля. В связи с последовательным затвердеванием стальных отливок создаются благоприятные условия для их ранней выбивки. Температура выбивки для каждой отливки устанавливается опытным путем. Процесс литья стали в кокиль следует организовать так, чтобы период пребывания отливки в кокиле был минимальным.

При литье стали важнейшей задачей является выбор защитного покрытия и поверхностного упрочнения кокилей. Все, что было сказано в первом и втором разделах и в части выбора рациональных покрытий и поверхностных упрочнений, в первую очередь относится к кокилям для получения стальных деталей. Хорошо зарекомендовало себя покрытие кокилей следующего состава, % по массе: 30—40 огнеупорного наполнителя (карборунда, циркона, окиси хрома и др.); 5—9 жидкого стекла; 0,7—0,8 борной кислоты; остальное — вода (до плотности 1,1—1,22). Покрытие наносят в несколько слоев, причем последний слой краски лучше готовить из более мелких частиц наполнителя. Такое покрытие наносят один раз в смену. Требуется лишь изредка подправлять его рабочий слой.

4. ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ЛИТЬЯ

Литье в кокиль дает наибольший эффект при изготовлении отливок особого вида и назначения. Но в каждом таком случае требуются необычные технологические решения. Ниже рассматриваются некоторые примеры таких решений. Часто литье в кокиль является

единственным возможным способом достижения высокого качества отливок ответственного назначения. К таким отливкам относятся штампы.

Большой вклад в развитие производства литых штампов (в том числе и литых в кокили) в нашей стране внес Б. А. Носков. Им была доказана целесообразность изготовления литых штампов с ручьями, разработана и осуществлена на практике технология литья штампов в кокилях.

Оригинальный процесс литья штампов со вставками показан на рис. 122. В разъемный кокиль 3 перед заливкой устанавливают нагретую до 840—900 К вставку 4 из стали Р18, и литейную полость 2 заливают через прибыль надставки 1 сталью 5ХНВЛ при 1820 ± 10 К. Вставку 4 нагревают во избежание образования трещин в обойме штампа. Для устранения в стали Р18 остаточного аустенита отливку троестратно отпускают (820—870 К, нагрев 3 ч). Сталь 5ХНВЛ модифицируют 0,3% КМ, который вводят совместно с 0,1% Al и 0,3% ферротитана на струю расплава. Стойкость литого штампа, как указывается в работе [88], повысилась в 15—20 раз в сравнении с напескованным, стоимость снизилась в 1,5—2 раза. Даже в случае низкой стойкости кокилей для изготовления подобных отливок расход на них всегда окупается.

К числу особых и интересных способов литья стали в кокиль можно отнести способ получения полых отливок с выплавляемым стержнем [63]. За последнее время все чаще появляются сведения об использовании таких стержней при литье в кокиль разных сплавов. В указанной работе приводится описание литья из стали 50Л полых цилиндров диаметром 90 мм, высотой 500 мм с толщиной стенки 20 мм.

Сущность процесса ясно из схемы, представленной на рис. 123:

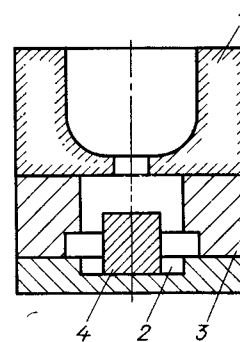


Рис. 122. Схема литья штампов

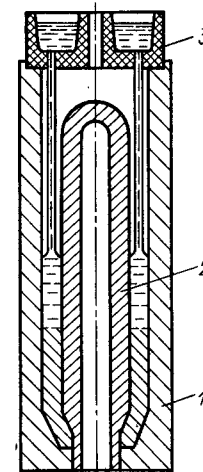


Рис. 123. Схема литья стали в кокиль с выплавляемым стержнем

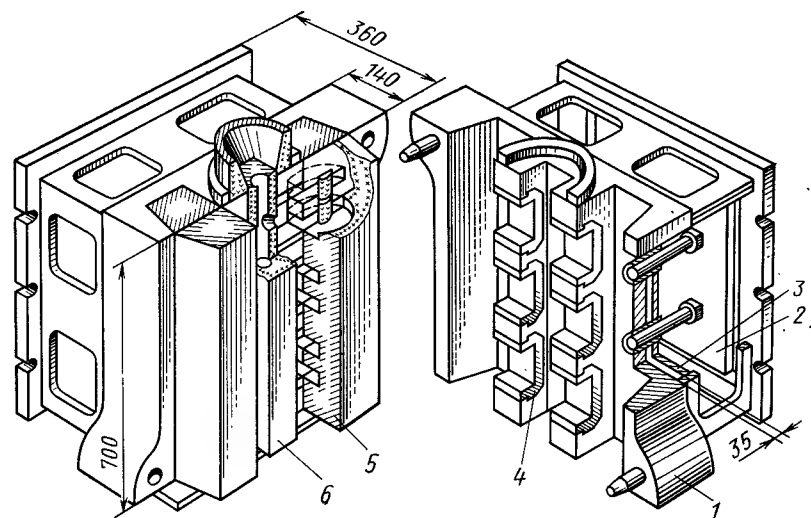


Рис. 124. Схема устройства многоместного кокиля для литья бил из стали 110Г13Л

в кокиль 1 вставляют выплаваемый металлический стержень 2 и форму заливают через дождевую литниковую систему, выполненную в литниковой чаше 3. Дождевая заливка оказалась наиболее приемлемой: при сифонной и боковой заливке стержень расплавлялся преждевременно и его металл сплавлялся с металлом отливки. Применение выплаваемых стержней позволило довести выход годного до 78%, разгрузить в тепловом отношении кокиль 1, повысить его стойкость и получить следующие механические свойства стали после термической обработки: $\sigma_b = 735 \div 918$ МПа; $\sigma_t = 382 \div 437$ МПа, $\psi = 17,4 \div 20,5\%$. Можно ожидать, что выплаваемые стержни позволят расширить область применения кокилей для литья стальных деталей, так как уменьшится опасность образования в отливках трещин и усадочных рыхлот.

В работе [8] описана технология литья из стали 110Г13Л бил массой 8,5—12,5 кг молотковых мельниц для разлома угля. Применяемый при этом водоохлаждаемый кокиль изображен на рис. 124. Корпус 1 такого кокиля — сварной, из стали Ст3, а поверхность отливки формируется сменными вставками 4 и стержнем 5. Литниковая система также выполнена в песчаном стержне 6. Корпус кокиля 1 охлаждается водой, проходящей по водяной коробке 3. Выталкиватели расположены в плите 2. Износостойкость бил, полученных в кокиле, повысилась на 30%.

Литье крупных стальных отливок представляет большие технические трудности, так как связано с изготовлением массивных

кокилей, которые сложно изготовить и механизировать. Между тем, как это показывает опыт, именно эти процессы позволяют получить наибольший эффект. Об этом свидетельствуют и примеры современных процессов литья крупных стальных деталей.

Крышка котла высокого давления, как указывается в работе [141], отливается в массивный литой кокиль из углеродистой (0,04—0,06% С) стали. Проведенными расчетами и постоянным наблюдением установлено, что наиболее напряженным местом кокиля является пояс, формирующий вертикальную стенку крышки. Средняя стойкость кокилей, выявленная на основе их трехгодичной эксплуатации, составила 219 заливок. Хотя такая стойкость обеспечивает получение значительного эффекта по сравнению с литьем в песчаные формы, она может быть заметно повышена путем упрочнения поясной части кокиля, которая в дальнейшем была выполнена из блочно-игольчатых элементов.

5. ВИДЫ БРАКА И СПОСОБЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

В ряде случаев внедрению литья стали в кокиль препятствует повышенный брак отливок. К числу наиболее часто встречающихся видов брака стальных отливок относятся горячие и холодные трещины, недоливы, газовые и усадочные раковины, несоответствие размеров требованиям чертежа.

Основным средством предупреждения горячих трещин является повышение технологичности стальных отливок, приспособление их конструкции к условиям литья в кокиль. Соответствующие принципы рассмотрены в параграфе 1.

Не менее важной мерой предупреждения трещин является подготовка расплава. Глубокое раскисление стали и ее модифицирование всегда оказывают благоприятное влияние. Дегазация стали также предупреждает образование трещин.

Центровые стержни особенно тонкостенных отливок с развитой поверхностью должны обладать хорошей податливостью, не содержать жестких каркасов; изготовление таких стержней полыми — обязательная мера предупреждения трещин.

Предупредить трещины в торцах тонких стенок можно путем снижения скорости их затвердевания и устранения заливок. На рис. 125 приведены два вида устройства знака стержней. В первом случае (рис. 125, а) из-за быстрого затвердевания торца отливки

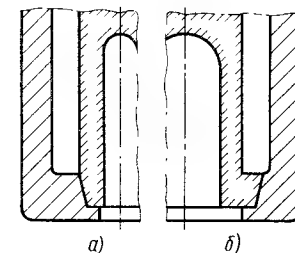


Рис. 125. Схема устройства знака стержня: а — обычный; б — предупреждающее трещины

и появления в нем заливов образование трещин было неизбежным. Небольшие изменения в устройстве знака (рис. 125, б) устранили эти недостатки, что благоприятно сказывалось на предупреждении трещин.

Газовые раковины возникают из-за «закупоривания» воздуха в «глухих» местах кокилей, некачественной стали, газотворной способности краски и стержней, а также из-за перегрева кокилей. Первая причина газовых раковин устраняется соответствующей вентиляцией, а последняя — соблюдением теплового режима формы и периодической очисткой ее рабочих поверхностей. Что касается газовых раковин из-за газонасыщенности расплава, то они возникают редко: в кокилях дополнительное растворение газов (особенно водорода) не происходит.

ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

1. ХАРАКТЕРИСТИКА СПЛАВОВ

Алюминиевые сплавы согласно ГОСТ 2685—75 разделяются по химическому составу на пять групп:

Группа I — сплавы на основе системы алюминий—кремний марок: АЛ2, АЛ4, АЛ4-1, АЛ9 АК7 (АЛ9В), АЛ34 (ВАЛ5), АК9 (АЛ4В). Их структура представляет собой α -твердый раствор кремния в алюминии и эвтектику, состоящую из α -твердого раствора и зерен кремния. Количество в структуре сплава эвтектики увеличивается с повышением содержания кремния и при 11,7% последнего состоит из эвтектики с температурой плавления 850 К.

Дальнейшее увеличение количества кремния в сплаве приводит к образованию первичных твердых его кристаллов. При наличии легирующих элементов последние растворяются в α -твердом растворе, упрочняя его, или образуют самостоятельные фазы (например, Mg_2Si , Al_3Ti и др.). Механические свойства алюминиево-кремнистых сплавов можно улучшить путем легирования микродобавками таких элементов, как В, Ti, Zr. Достоинствами сплавов этой группы являются хорошие литейные свойства и герметичность, а также сравнительно простая технология выплавки и литья. Недостатки их состоят в склонности к образованию крупнозернистой грубой эвтектики в структуре и к повышению газонасыщенности.

Группа II — сплавы на основе алюминий—кремний—медь. Их марки: АЛ3, АЛ5, АЛ5-1, АЛ6, АЛ32, АК5М2 (АЛ3В), АК7М2 (АЛ10В), АК4М4 (АЛ15В). Сплавы этой группы обладают более высокой прочностью и жаропрочностью, чем сплавы системы алюминий—кремний, а их литейные свойства лучше, чем у сплавов системы алюминий—медь.

Группа III — сплавы на основе системы алюминий—медь марок: АЛ7, АЛ19, АЛ33 (ВАЛ1). Структура этих сплавов состоит из α -твердого раствора меди в алюминии, химического соединения Al_2Cu и эвтектики. Концентрация меди в твердом растворе изменяется в зависимости от температуры. При температуре 821 К (548° С) в α -твердом растворе содержится 5,65% Cu, а при комнатной температуре всего 0,2%. Этим объясняется чувствительность сплавов к скорости затвердевания, а также повышение свойств после закалки с последующим старением. Легированный твердый раствор и наличие химических соединений в структуре обуславливают жаропрочность и повышенные прочностные характеристики сплавов группы III.

Особенно высокой прочностью обладает сплав АЛ19, в состав которого входит марганец, образующий сложное соединение

Al_2Mn_2Cu , способствующее улучшению механических свойств, особенно при повышенных температурах.

Недостатки сплавов группы III: пониженная жидкотекучесть, увеличенная склонность к образованию горячих трещин, а также низкая герметичность.

Группа IV — сплавы на основе системы алюминий—магний, используются преимущественно с добавкой легирующих элементов: Mn, Si, Ti, B, Zr. Сюда относятся сплавы марок АЛ8, АЛ13, АЛ22, АЛ28, АЛ23-1, АЛ27, АЛ27-1, АЛ28. Основой структуры этих сплавов является твердый раствор магния в алюминии, состав которого изменяется с понижением температуры. При 708 К (435°С) он содержит 14% Mg, а при комнатной температуре — в 10 раз меньше (1,4%). Избыток магния образует хрупкую β -фазу (Al_3Mg_2), количество которой увеличивается с уменьшением скорости охлаждения отливки. Специальные добавки или случайные примеси дают самостоятельные фазы (например, Mg_2Si , Al_6Mg_4Cu , Al_3Ni , Al_3Fe и др.) или они могут входить в твердый раствор. Все это влияет на изменение свойств сплавов, при этом степень влияния зависит от дисперсности и характера этих фаз. Как правило, сплавы этой группы обладают высокой коррозионной стойкостью, хорошими механическими свойствами и малой плотностью. Кроме того, они хорошо обрабатываются резанием и полируются.

Группа V — сплавы на основе алюминия с другими элементами (в том числе никеля, цинка, кремния, железа). Их марки: АЛ1, АЛ11, АЛ21, АД24, АЛ25, АЛ30, АК21М2, 5Н2,5 (ВКЖЛС-1). Сюда же можно отнести используемые в настоящее время сплавы АЛ26, АЛ20, АЛ18В и др. Это преимущественно жаропрочные сплавы. Каждый из них отличается еще каким-либо специальным свойством в зависимости от того, для каких целей сплавы предназначены. Так, например, сплавы для поршней (АЛ25, АЛ26, АЛ30) должны иметь повышенную износостойкость и малый коэффициент линейного расширения. Основными компонентами сплавов этой группы являются кремний или медь, от содержания которых в основном и зависят структура и свойства. Дополнительное легирование небольшими добавками ряда элементов обеспечивает сплавам повышение жаропрочности за счет увеличения сопротивляемости пластическим деформациям. В качестве легирующего элемента используется и железо (сплавы АЛ18В и АЛ20), которое является вредной примесью для всех остальных сплавов на алюминиевой основе. Показатели литейных свойств алюминиевых сплавов колеблются в довольно широких пределах и зависят от их состава. В табл. 30 представлены данные о литейных свойствах основных сплавов.

Горячеломкость определяется по общепринятой кольцевой пробе С. И. Спектровой и Г. В. Лебедевой. Наружный диаметр пробы 107 мм, толщина 5 мм.

Таблица 30

Типичные литейные свойства основных алюминиевых сплавов
(температура заливки 973 К)

№ группы	Марка	Усадка, %		Жидкотекучесть, мм, по пробе		Горячеломкость	Герметичность, кгс/см ²
		линейная	объемная	прутковой	спиральной		
I	АЛ2	0,9	3,0—3,5	420	820	5	160
	АЛ4	1,0	3,2—3,4	360	750	5	260
	АЛ9	1,0	3,7—3,9	350	770	5	190
	АЛ34	1,0	—	550	—	5	350
	(ВАЛ5)						
II	АЛ3	1,15	4,0—4,2	240	700	12,5	140
	АЛ5	1,10	4,5—4,9	344	750	7,5	160
	АЛ6	1,10	4,8—5,0	300	650	10	230
	В124	1,10	3,2—3,4	350	800	7,5	350
III	АЛ7	1,40	6,5—6,8	163	280	3,5	50
	АЛ19	1,25	—	205	410	32,5	70
IV	АЛ8	1,3	4,8—5,0	280	600	22,5	60
	АЛ13	1,2		320	500	12,5	118
	АЛ22	1,2		380	650	15	130
	АЛ27	1,2		270		12,5	60
V	АЛ1	1,3	6,4—6,2	260	—	27,5	90
	АЛ21	1,2		360	700	22,5	100
	АЛ24	1,2		230		22,5	160
	АЛ25	1,1		425		5	

Внутренний диаметр колец изменяется от 7 до 97 мм, обеспечивая ширину кольца от 50 до 5 мм. Показателем горячеломкости является максимальная ширина кольца, при которой появляется первая трещина. Чем меньше эта ширина, тем меньше склонность сплава к образованию трещин. Для определения жидкотекучести используются стандартные прутковые или спиральные пробы, отливаемые в песчано-глинистые формы.

Лучшие литейные свойства имеют сплавы типа силуминов и более низкими обладают сплавы III (алюминиево-медные) и IV (алюминиево-магнелиевые) групп. Величина действительной литейной усадки сплавов зависит не только от их природы, но и от сложности и размеров отливки. На практике принято считать, что усадка в зависимости от сплава находится в следующих пределах: для мелких отливок 0,9—1,35, для средних — 0,7—1,2 и для крупных — 0,6—1,0%. Нижние пределы относятся к спла-

вам на основе системы Al—Si, а верхние — к сплавам III и IV групп.

Характерной особенностью всех алюминиевых сплавов является повышенная опасность образования газовой и газоусадочной пористости. На поверхности алюминиевой отливки легко образуется прочная и плотная пленка окисла, которая препятствует удалению газов, выделяющихся из металла при его охлаждении. Это и объясняет тот факт, что алюминиевые отливки легко поражаются газовой пористостью при сравнительно небольшом содержании газов в металле. Так, даже при наличии в сплаве водорода в количестве 0,9—2,0 см³ на 100 г металла возникает опасность образования газовых раковин, в то время как в чугунах его содержание может достигать 4—5 см³, а в стали — до 10—12 см³ (без особой опасности образования газовых раковин).

Особенно легко поражаются газовыми раковинами отливки из сплавов, содержащих кремний. Разработка технологического процесса изготовления отливок из алюминиевых сплавов производится с учетом всех его особенностей и недостатков. Большое влияние на структуру и качество сплава отливки оказывает скорость затвердевания и охлаждения.

2. ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

Увеличение скорости затвердевания обеспечивает измельчение структурных составляющих сплава — уменьшается зерно твердого раствора, увеличивается дисперсность эвтектики и вторичных фаз, образующихся при наличии специально введенных или случайных примесей. Некоторые неблагоприятно действующие соединения вообще не образуются или уменьшаются по количеству. Так, структура силумина, залитого в кокиль, близка к структуре модифицированного сплава; размеры кристаллов кремния значительно меньше, чем при литье в песчаные формы (см. гл. III). Известно также [123], что литье в кокиль резко повышает эффект модифицирования по сравнению с литьем в песчаные формы, а также нейтрализует вредное действие железа и других примесей. Поэтому допускается в сплавах для этого вида литья более высокое количество железа, чем при литье в песчаные формы. Измельчение структуры в результате более значительного переохлаждения сплава при кристаллизации в кокиле, а также увеличение при этом эффекта модифицирования приводит к улучшению его механических свойств. Результаты испытания сплава АЛ27-1, залитого в сухие песчаные формы и в кокили, наглядно показывают преимущества последнего способа литья (при литье в сухую песчаную форму $\sigma_B = 26$ кгс/мм², $\delta = 5\%$; при литье в кокиль — $\sigma_B = 42$ кгс/мм², $\delta = 31\%$).

С изменением скорости охлаждения от 15,6 до 83 град/мин. увеличивается предел прочности сплава АЛ19 с 38,2 до

41,5 кгс/мм² и относительное удлинение с 7,3 до 16,0%. Такой же характер имеет изменение механических свойств при повышенных температурах (табл. 31).

Таблица 31

Влияние на механические свойства сплава АЛ27-1 температуры и материала формы

Температура испытаний, °С	Литье в песчаную форму			Литье в кокили		
	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	a_H , кгс·м/см ²	σ_B , кгс/мм ²	δ , %	a_H , кгс·м/см ²
20	23,9	3,8	2,3	36,8	16,4	5,6
150	17,9	2,9	2,1	32,6	37,2	5,6
200	16,9	3,7	1,7	21,1	15,7	4,3
300	8,9	10,8	1,1	10,3	49,0	2,5
400	3,6	24,2	0,2	4,7	100,8	0,3
500	1,1	3,6	0,2	1,8	16,8	0,2

Повышается прочность сплавов при термической усталости. Благоприятное влияние увеличение скорости охлаждения оказывает и на свойства сплавов при низких температурах. Улучшается герметичность, что особенно важно для сплавов, негерметичных по своей природе из-за большого интервала их кристаллизации (АЛ19, АЛ27-1 и др.). Увеличение скорости охлаждения уменьшает опасность образования газовой и газоусадочной пористости в отливках.

Авторы работы [59] объясняют это следующим образом. Часть водорода, попавшего в алюминиевый расплав, образует с Al_2O_3 соединение $\gamma-Al_2O_3 \cdot H$, а избыток растворяется в жидком металле. При затвердевании сплава указанное соединение диссоциирует с выделением водорода. Степень диссоциации его зависит от скорости охлаждения и уменьшается с увеличением последней. При быстром охлаждении распад химического соединения $\gamma-Al_2O_3 \cdot H$ не произойдет и пористость будет образовываться только за счет выделения растворенного водорода, которое также затрудняется при увеличении скорости охлаждения.

Количество водорода, растворившегося в металле при литье в кокиль, меньше, чем при литье в песчаные формы. Например, если в 100 г сплава, залитого в кокиль, содержалось 1,6—1,8 см³ водорода, то в металле, залитом в песчаные формы, его содержание достигает 2,3—3,5 см³. Таким образом, литье в кокиль обеспечивает получение более плотных отливок и, следовательно, с более высокими механическими свойствами сплава:

Балл пористости	1	2	3	4	5
σ_B , кгс/мм ²	26,6	26,2	25,0	20,0	15,0
δ , %	5,0	4,7	3,0	2,0	1,5

При литье в кокиль уменьшается не только газовая, но и газоусадочная пористость.

Рассмотренные особенности формирования структуры и свойств отливок из алюминиевых сплавов вытекают из общих положений теории литья в кокиль, изложенных в первом разделе.

3. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

В связи с особыми свойствами алюминиевых сплавов (повышенная усадка, возможность окисления при заливке, склонность к образованию плен, газовой пористости и др.) возникает необходимость устройства особых литниково-питающих систем, которые подробно описаны Н. М. Галдиным [39]. Расчет литниковых систем и выбор их конструктивных размеров при литье в кокиль, как указывает Н. М. Галдин, осуществляют по тем же методикам, исходя из тех же рекомендаций, которые разработаны для литья в песчаные формы. Вместе с тем необходимо учитывать особенности литья в кокиль, состоящие, прежде всего, в повышенной скорости охлаждения металла и газонепроницаемости формы, которые вызывают повышенную опасность образования газоусадочных и газовых раковин, недоливов, неспаев, загрязнений неметаллическими включениями.

При конструировании кокилей стремятся свести до минимума количество и площадь поверхностей разъема, что затрудняет, а часто делает невозможным применение разветвленной литниковой системы с использованием элементов, задерживающих шлаковые включения и обеспечивающих ламинарность потока. Острые кромки каналов, выполненных в кокиле, способствуют образованию завихрений потока металла, в результате чего облегчается разрыв окисных плен и попадание их внутрь расплава. Все эти особенности и определяют выбор элементов и конструкции литниковой системы для литья в кокиль.

Неправильное устройство этих систем приводит к образованию многих видов брака: прежде всего газовых и усадочных раковин, трещин, шлаковых включений и плен. Наглядно это иллюстрируется примерами, приведенными в работе [159] и тремя схемами

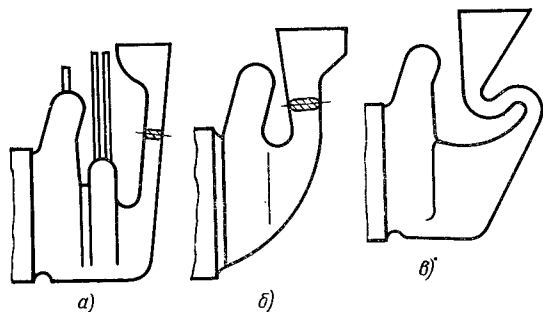


Рис. 126. Варианты литниково-питающих систем поршня

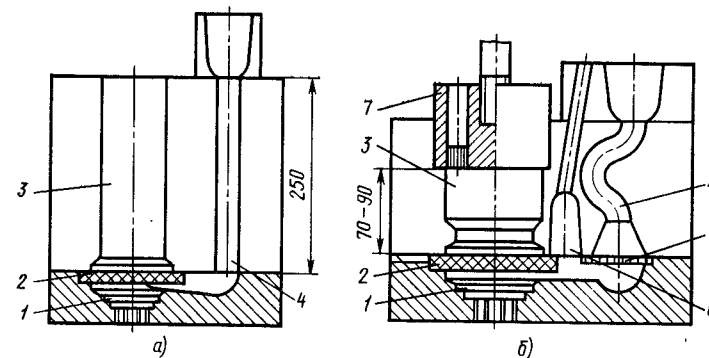


Рис. 127. Старое (а) и новое (б) устройство литниково-питающей системы в кокиле крыльчатки:

1 — литейная полость лопатки; 2 — стержень; 3 — прибыль; 4 — стояк; 5 — сетка; 6 — бобышка; 7 — надставка

(рис. 126) литниково-питающих систем в кокиле поршня. На первый взгляд представляется, что каждая из них удовлетворяет общим принципам устройства литниково-питающих систем при литье в кокили деталей ответственного назначения. Однако их сравнительная проверка показала преимущество системы б.

Убедительным доказательством роли литниково-питающей системы в получении качественных отливок и всей эффективности литья в кокиль может служить также сравнение двух процессов изготовления крыльчаток (рис. 127). По одной технологии (рис. 127, а) брак отливок доходил до 85—90%, в том числе и по недоливам — 30—70%, несмотря на повышение температуры заливки сплава АЛ9 до 1030—1060 К и увеличение скорости заливки [60]. По другой технологии (рис. 127, б) металл поступал в полость 1 спокойно: газы, выделяющиеся из стержня 2, им не захлестывались. Изменения литниково-питающей системы свелись к следующему. Вместо высокого прямого стояка применен стояк 4 низкий змеевидный, на дне которого была поставлена фильтровальная сетка 5, а на питателе — бобышка 6 с выпором для гашения завихренного движения металла и удаления газов. Уменьшена и высота прибыли 3; прибыль закрыта надставкой 7. Несмотря на то, что температура заливки сплава была снижена до 990—1030 К, недоливы не имели места. В связи с заменой литниково-питающей системы кокиля крыльчаток брак отливок снизился до 10%, расход жидкого металла сократился на 30—50%.

Основные положения правильного устройства литниковых систем для кокилей состоят в том, чтобы обеспечить: направленное затвердевание отливки; поступление в полость формы спокойной струи металла; надежное улавливание плен и шлака, образовав-

шихся в металле до поступления его в форму; предотвращение образования их уже в литейной полости; надежное питание тепловых узлов отливки.

Направленность затвердевания обеспечивается надлежащим расположением отливки в форме с размещением тонких стенок в нижней части кокиля, использованием искусственного охлаждения отдельных утолщенных частей отливки, применением заливки сверху с поворотом кокиля на разные углы. Специально разработанная установка позволяет ускорить поворот формы и обеспечить повышение эффективности данного процесса (Н. М. Галдин, И. А. Релин, А. с. № 393025, 1973).

С целью более плавного поступления металла и очистки его от плен и шлака используют не прямые вертикальные стояки, а более сложной конфигурации — зигзагообразные, змеевидные, в виде «гусиной шейки», наклонные и др. — с подводом металла преимущественно в нижнюю часть отливки. Верхний подвод металла применяют только в случае малой высоты отливки (до 100 мм). Для подвода металла к полости формы рекомендуются щелевые вертикальные питатели зачастую неодинакового сечения по высоте. Может быть использован сифонный, а при высоких отливках — многоярусный подвод металла. В любом случае применяют расширяющуюся литниковую систему, которая обеспечивает минимальную скорость струи металла на выходе из питателей в форму.

Заливка с поворотом формы дает возможность регулировать скорость потока в процессе литья. С этой же целью применяют специальные устройства, например, в стояке устанавливают конический стопор с приводом. В начале заливки он опущен вниз, что обеспечивает малый расход металла. По мере заполнения формы металлом стопор поднимается вверх и расход металла увеличивается (И. А. Релин, Н. М. Галдин, А. с. № 328981, 1972 г.). В случае литья высоких отливок в стояке может быть установлен поршень на штоке, движущийся вниз, что приводит к гашению скорости потока и предупреждает вспенивание металла в зумпфе (Н. М. Галдин, А. с. № 346016, 1972 г.). Для плавного заполнения крупных массивных отливок простой конфигурации применяют литниковую систему, выполненную в самовсплывающем стержне (Н. М. Галдин, А. с. № 465260, 1975 г.).

Для улавливания шлака и плен в литниковых системах используют фильтры и сетки. Надежным средством является применение фильтров из стеклоткани ССФ-4. Рекомендуется такие фильтры устанавливать в нижней части литниковой системы, чтобы они незначительно уменьшали напор и обеспечивали снижение турбулентности потока. Фильтры преимущественно используют при литье тонкостенных отливок. Исследования [79] показали, что из 100 случаев брака в виде течи отливок из сплава АЛ9 при гидротестированиях 95 случаев приходилось на тонкие стенки из-за ско-

пления там окисных плен. По этому виду дефекта браковались до 40% отливок с толщиной стенки 3—5 мм. После применения фильтров брак снизился до 4,5%.

Для крупных деталей иногда применяют металлические сетки, которые устанавливают между прибылью и вертикальным щелевым питателем. Представляет интерес заливка формы через заливочную трубку, на конце которой жестко закреплен мешочный фильтр. Эту трубку вводят непосредственно в форму, в стояк либо через прибыль в зависимости от конфигурации отливки и опускают по возможности на дно формы. По мере наполнения формы металлом трубка поднимается, при этом расплав поступает в верхнюю часть отливки, а шлак удерживается в фильтре (В. И. Фундатор и др., А. с. № 347113, 1972 г.).

Для получения плотной отливки используют прибыли. Они могут располагаться непосредственно над питаемым узлом или находиться между стояком и питателем. Такое расположение прибыли чаще всего используют при щелевых и многоярусных литниковых системах. В верхней части прибыли делают канал, соединяющий ее с атмосферой.

4. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА КОКИЛЕЙ

Особенность устройства кокилей для алюминиевых сплавов обусловливается многими факторами: сравнительно низкой температурой заливки расплава, преимущественно сложной конфигурацией отливок, их разностенностью, чувствительностью к нарушению направленного затвердевания, высокой пластичностью сплава, чувствительностью жидкого сплава к воздействию формы и атмосферы и др. Алюминиевый расплав ввиду невысокой температуры и образования окисной пленки оказывает менее интенсивное тепловое воздействие на кокиль, чем сталь или чугун. Кокиль нагревается до более низких температур и более равномерно по сечению.

Для литья алюминиевых сплавов используют относительно толстостенные кокили; они имеют повышенный срок службы и в них легче получать тонкостенные отливки благодаря большой тепловой инерции. Строгие подходы к выбору толщины стенок кокилей изложены в гл. VIII. Укажем практические рекомендации: при толщине стенки 5 мм толщина кокиля должна быть 20 мм для сплавов с пониженными литейными свойствами и 40 мм — для сплавов с хорошими литейными свойствами; при толщине отливки 20 мм — соответственно 40 и 80 мм. Практика работы подтверждает целесообразность изготовления толстостенных кокилей. Имеют свои преимущества и тонкостенные кокили [175]. Для их изготовления требуется меньше металла, их легче подогревать перед заливкой, они иногда улучшают условия питания отливок, уменьшают вероятность образования в них трещин.

Следует отметить целесообразность использования алюминиевых анодированных кокилей для изготовления отливок из алюминиевых сплавов. Материалы, рекомендуемые для рабочих стенок таких форм, указаны в табл. 20. По другим данным для алюминиевых кокилей следует применять теплостойкие и термически выносливые поршневые сплавы [164].

При получении в кокилях сложных и разностенных алюминиевых отливок должны быть предусмотрены особые меры, предупреждающие нарушение направленного или равномерного затвердевания. Для этой цели могут быть использованы различные способы регулирования скорости затвердевания частей отливки. Их выбор диктуется необходимой степенью воздействия на условия теплообмена, особенностью отливки и устройства кокиля. В качестве примера на рис. 128 приведена конструкция кокиля для литья детали топливного насоса [101]. По принятой схеме заливки формы в наиболее тяжелых условиях находятся стержни-вставки 3: они перегреваются и быстро выходят из строя; в отливке нарушается направленность затвердевания, образуются рыхлоты. В связи с этим введено автономное водяное охлаждение. Для лучшего контакта камеры 2 с кокилем 1 воздушный зазор между ними устранен теплопроводной графитной набивкой. Водяное охлаждение работает в автоматическом режиме. Внедрение такого охлаждения позволило сократить цикл работы (съем с одного кокиля увеличился с 80 до 200 отливок за смену), улучшить качество отливок,

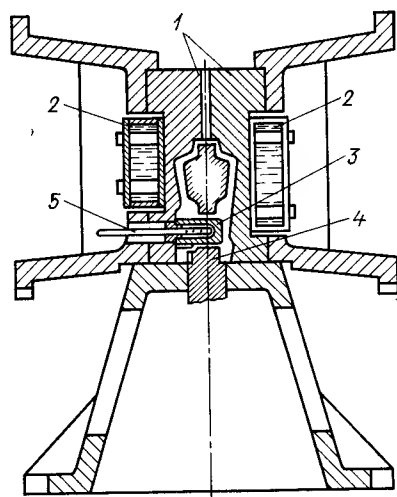


Рис. 128. Эскиз кокиля с автономным охлаждением:
1 — кокиль; 2 — водоохлаждаемые камеры; 3 — боковая вставка-стержень; 4 — нижний стержень; 5 — трубка

значительно повысить стойкость кокилей, сократить на 1,3 кг расход металла на каждую отливку и получить общую экономию 10 тыс. руб. в год. Для регулирования тепловых условий литья применяют также локальное охлаждение кокиля [62].

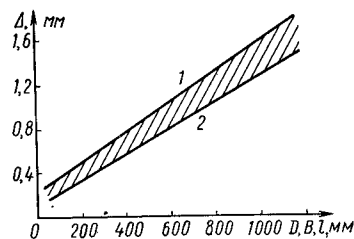


Рис. 129. Зависимость величины зазоров Δ между подвижными частями кокиля от их размеров (диаметра D , ширины B , длины l)

Получение отливок из алюминиевых сплавов в отдельных случаях целесообразно в кокилях с литыми рабочими полостями. Стоимость таких кокилей намного ниже стоимости кокилей, подвергаемых механической обработке. Применяя кокили без обработки, следует учитывать, что обычно отливки из алюминиевых сплавов требуют большей точности и чистоты поверхности, чем отливки из черных сплавов. Поэтому необходимо заботиться о качестве изготовления заготовок для кокилей, применять особые способы их литья, обеспечивающие точность размеров и достаточно чистую литую поверхность. Точность изготовления кокилей определяется точностью отливок.

Труднее всего выбирать оптимальные зазоры между подвижными частями формы. Авторами работы [38] изучался этот вопрос в течение нескольких лет, в результате чего предложены таблицы и график по выбору зазоров. На рис. 129 дана графическая зависимость целесообразных зазоров (1 — максимальных, 2 — минимальных) между подвижными частями от размеров последних. Пределы этих зазоров (на графике — область заштрихована) обеспечивают нормальное сопряжение подвижных частей кокиля, исключают их заклинивание и перекосы, а также не служат местами возникновения заливов металла. Многолетняя практика подтвердила правильность разработанных рекомендаций.

5. ПОДГОТОВКА КОКИЛЕЙ И ТЕМПЕРАТУРА ЗАЛИВКИ

Операции по подготовке кокилей включают подготовку песчаных стержней (если они предусмотрены технологическим процессом), нанесение на кокили покрытий и обеспечение заданной начальной температуры формы.

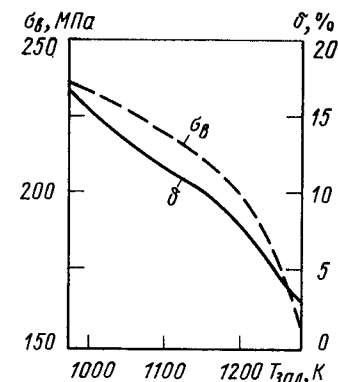
Подготовка песчаных стержней заключается обычно в их тщательной отделке и сушке. Указывается, например, что эффективным способом является прокаливание при 670 К в течение 5 мин [151].

Рецепты некоторых покрытий, опробованных на практике и давших хорошие результаты, приведены в табл. 32. Ряд составов покрытий разработан в НИИСЛе. Почти все покрытия следует наносить на рабочие поверхности очищенных и подогретых кокилей. Лучше всего это делать перед длительным перерывом в работе, используя теплоту кокиля после выбивки последней отливки. Окрашивать холодный или перегретый (свыше 520 К) кокиль нецелесообразно, в последнем случае краска может вскипеть и не образовать сплошной пленки. Чаще всего различные элементы кокиля в зависимости от их назначения окрашивают различными красками. Толщина покрытия определяется необходимыми условиями охлаждения отливки.

Т а б л и ц а 32

Покрyтия для кокилей

Номер по пор.	Состав краски	Температура кокиля, °С	Способ нанесения; применение
1	Высоковоспламеняющееся масло — 500 г Керосин — 200 г Канифоль — 30 г Алюминиевый порошок — 10 г	60—200	Пульверизатором
2	Огнеупорный порошок (окись алюминия, хромитовая мука, графит и др.) — 30—60% Натриевый метаалюминат — 1—18% Вода — 30—60% Суспензатор (камедь или полисахарит) — 0,1—1,0%	100—250	»
3	Цинковые белила сухие — 15% Асбестовая пудра — 5% Жидкое стекло — 3% Вода — 77%	150—200	Для рабочих поверхностей
4	Асбестовый порошок — 8,7% Мел — 17,5% Жидкое стекло — 3,5% Вода — 70,3%	150—200	Для литников
5	Асбестовый лист — 100% Жидкое стекло (для склеивания)	20—50	Для облицовки при-быльной части кокиля
6	Тальк — 30% Жидкое стекло — 16% Вода — 54%	250—300	Как первый слой покрытия или для поверхностей, не соприкасающихся с жидким металлом (например, пластины в пакетах податливых элементов)
7	Цинковые сухие белила — 15% Жидкое стекло — 2% Вода — 85%	—	Окунанием Для заливочных приспособлений
8	Окись железа Fe_2O_3 — 25—30% Вода — (плотность 1,2—1,3 г/см ³) — 75—70%	Сушка 170—200	Окунанием, покрытие пылевидным тальком
9	Отмученный мел — 5% Жидкое стекло — 5% Вода — 90%	—	Для тиглей и плавильного инструмента
10	Графит — 17% Глина — 18% Жидкое стекло — 5% Вода — 60%	—	То же

Рис. 130. Зависимость свойств сплава АЛ-19 от температуры заливки $T_{зал}$ при $T_{2H} = 100^\circ C$ 

Перед заливкой жидким металлом кокили подогревают до определенной температуры, чем также влияют на скорость охлаждения отливки. Так, при нагреве кокиля от 370 до 670 К скорость охлаждения центральной части слитка диаметром 70 мм из сплава АЛ19 изменяется от 83 до 15,6 град/мин. Однако следует помнить, что повышение скорости затвердевания способствует улучшению свойств сплава лишь до определенного предела. Чрезмерное же ее увеличение может привести к макро- и микродефектам отливки (неспай, недоливы, сосредоточенная усадочная пористость) и к снижению качества сплава. Поэтому заливка в холодный или слабо подогретый (менее, чем на 100 град.) кокиль не рекомендуется. В свою очередь, значительный нагрев кокиля (свыше 670 К) вызывает огрубление структуры, увеличивает опасность образования пористости и ухудшает служебные свойства металла.

Так же влияет и повышение температуры заливаемого металла. На рис. 130 приведены данные изменения свойств сплава АЛ19 в зависимости от температуры заливки, из которых видно неблагоприятное влияние повышения температуры заливаемого металла на свойства, во-первых, вследствие уменьшения скорости затвердевания отливки, а во-вторых, вследствие большей газонасыщенности металла.

Каждый из рассмотренных факторов так либо иначе влияет на термические условия литья и, следовательно, определяет наиболее важные условия формирования отливки. Все они связаны между собой единым физическим механизмом. Поэтому выбор каждого из них должен проводиться с учетом влияния всех других. Возможности комплексного подхода определяются идеями и методами теории литья (см. первый разд.).

6. ПОДГОТОВКА МЕТАЛЛА И ЗАЛИВКА

Плавка алюминиевых сплавов может проводиться в различных плавильных агрегатах: в тигельных горнах, пламенных печах, электропечах сопротивления различных конструкций и в индукционных печах промышленной частоты. По качеству лучшим считается металл, выплавленный в индукционных печах промышленной частоты. Так, например, количество неметаллических включений в металле, выплавленном в индукционной печи, составило

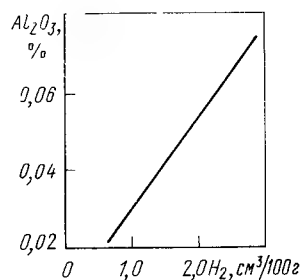


Рис. 131. Зависимость между содержанием водорода и оксидов в жидком алюминии

0,09 mm^2/cm^2 , а в пламенных газовых печах — 0,26 mm^2/cm^2 . Содержание водорода соответственно 0,11 и 0,47 $cm^3/100 g$.

В цехах массового производства и при литье мелких отливок целесообразно кроме плавильных печей устанавливать раздаточные печи, обслуживающие данный кокиль или группу кокилей.

Ведение плавки алюминиевых сплавов при литье в кокиль практически ничем не отличается от ведения плавки при других способах литья [86, 110]. Основное внимание должно быть обращено на предупреждение окисления и растворения газов в жидком металле. Окисление приводит к потерям легирующих элементов и основного металла, загрязнению расплава оксидами алюминия. Последние не только дают плены и неметаллические включения, но и способствуют растворению водорода в расплаве. Существует прямая зависимость между содержанием оксидов и количеством растворенного водорода в металле (рис. 131).

Алюминиевые сплавы, особенно на основе системы алюминий—кремний, нуждаются в модифицировании с целью измельчения структуры и повышения механических свойств. Правда, при кокильном литье, как уже было отмечено, измельчение структуры происходит из-за большой скорости затвердевания, однако некоторые сплавы все же необходимо модифицировать, прежде всего заэвтектические силумины, применяющиеся в качестве поршневых сплавов.

В этих сплавах при увеличении скорости охлаждения, достигаемого снижением температуры кокиля, получить достаточно высокие механические свойства и хорошую структуру невозможно. Это можно достичь только путем модифицирования сплава [151].

В качестве модификатора используют фосфор в количестве 0,10—0,17%. Натрий, который является прекрасным модификатором для доэвтектических и эвтектических силуминов, совершенно не пригоден для модифицирования заэвтектических сплавов. Присутствие в заэвтектических силуминах ничтожно малых примесей натрия, а также кальция резко снижает эффект модифицирования фосфором, поэтому рекомендуется иметь в сплаве не более 0,001% Na и 0,004% Ca. Модифицирующее действие оказывает также ряд элементов, образующих с алюминием тугоплавкие интерметаллиды (Mo, Ti и др.). У заэвтектических силуминов наиболее мелкозернистая структура достигается в случае введения в него одновременно 0,02% P, 0,02% Ti и 0,02% V.

7. ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ЛИТЬЯ

Литье поршней. Поршни представляют технологически сложную отливку. Они отличаются большой разностенностью, имеют резкие переходы от толстых сечений к тонким. Поршни большинства конструкций имеют внутреннюю полость, затрудняющую извлечение стержней, что вынуждает делать последние разъемными из трех, пяти или даже семи частей. После заливки формы металлом и образования достаточно прочной корки на поверхности отливки извлекается средняя часть стержня, чем обеспечивается некоторая его податливость. Через некоторое время извлекают и остальные его части. На рис. 132 изображены две конструкции поршня двигателя СМД-60. Для прежней конструкции (рис. 132, а) требовался стержень из пяти частей. Новая конструкция поршня (рис. 132, б) позволила упростить устройство стержня — вместо пятиклинного моноклинового металлического стержня. Аналогичные изменения были произведены и в технологии литья поршней двигателя СМД-14 [92].

В настоящее время существуют два принципиально различных способа литья поршней — литье днищем вверх и литье днищем вниз. При литье днищем вверх преимущественно используется верхняя подача металла и установка верхней прибыли. Это создает более благоприятные условия для питания утолщенной части отливки — днища. Однако верхняя подача ограничивается высотой отливки, так как при литье высоких поршней создается опасность разбрызгивания металла, загрязнения его неметаллическими включениями и образования заворотов. Сифонный же подвод металла уменьшает эффективность использования верхней прибыли.

Способ литья днищем вверх может быть успешно использован только в случае простой конфигурации внутренней полости отливки, при которой возможно применение одного цельного стержня — моноклина. Такой способ, кроме всего, упрощает механизацию и автоматизацию процесса. Как правило, его применяют только для литья мелких поршней (с диаметром до 100 мм). На ВАЗе поршни автомашин получают именно таким способом

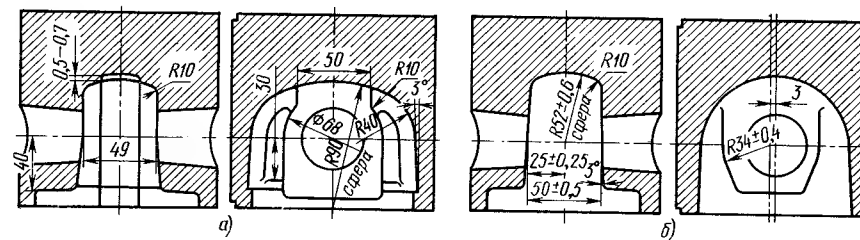


Рис. 132. Старая (а) и новая (б) конструкции поршня двигателя СМД-60

в автоматизированных кокилях. В средней части днища отливки установлена открытая прибыль. Металл заливается сверху в два стояка одновременно. Стойки имеют перегиб, в результате чего происходит снижение кинетической энергии металла. Весь цикл изготовления поршня от заливки до выбивки составляет 45—50 с.

Большинство поршней получают литьем днищем вниз. В этом случае используют водоохлаждаемые поддоны кокиля, часто выполняемые из меди, что способствует созданию более направленной кристаллизации и улучшению макроструктуры металла днища поршня. Однако в большинстве случаев только путем этого способа обеспечить плотный металл днища практически невозможно. Необходимо организовать достаточное питание его из боковой прибыли. Она выполняется массивной и на всю высоту или выше отливки. Для повышения эффективности работы прибыли поверхность оформляющей ее полости формы покрывают теплоизолирующей краской. Суммарная масса прибылей составляет обычно 40—60% от черной массы поршня и зависит от его конструкции и материала. В крупных поршнях ставится кольцевая прибыль и на юбке.

Питатель обычно применяют щелевой, имеющий высоту, почти равную высоте поршня с одинаковым сечением по всей высоте или различного сечения в различных местах (например, утолщение в массивном сечении у днища). Иногда делают более низкие питатели, подводящие металл только в нижнюю часть.

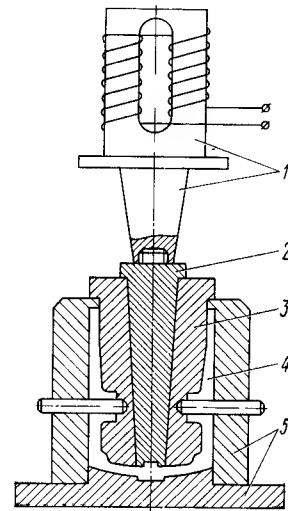
Стояк выполняют таким, чтобы обеспечить спокойное заполнение металлом формы и предотвратить попадание окисных плен. Распространенными являются стояки типа «гусиной шейки». Применяют также змееобразные и простые наклонные.

Интересное решение для литья поршней из заэвтектических силуминов предложено в работе [41]. Для этого сплава применение хорошо зарекомендовавшей себя литниковой вертикально-щелевой системы с гусиной шейкой приводит к ухудшению структуры сплава. Это объясняется значительным (ниже ликвидуса) снижением температуры металла ввиду прохождения по сложному пути в стояке, что вызывает чрезмерный рост и обособление первичных кристаллов кремния.

В работе [41] указывается, что преждевременное выделение первичного кремния в литниковой системе предотвращается увеличением объемной скорости заливки путем применения «карандашной» литниковой системы. В этом случае стояк состоит из четырех каналов, расположенных в половинах кокиля в шахматном порядке. Ввиду близкого расположения каналов (не более 2 мм) охлаждение металла в них замедляется. В то же время перемычки между каналами имеют достаточную толщину (до 14 мм), чтобы противостоять выкрашиванию из-за разгара и трещин.

Рис. 133. Схема литья поршня с воздействием ультразвука:

1 — магнестрикционный преобразователь; 2 — центральный клин; 3 — боковой клин; 4 — отливка; 5 — кокиль



В нижней своей части каналы соединяются общим щелевым каналом с меньшей площадью поперечного сечения. Металл в прибыль подводится по касательной, чтобы создать дополнительное торможение. Кстати, для этого поршня выполнен питатель с различным сечением по высоте: в верхней части его ширина равна 12 мм, в нижней — 16 мм, а в месте перехода «юбки» в днище сделано утолщение, равное 25 мм; все это улучшает условия питания.

При литье крупных со значительно утолщенными днищами поршней применяют кантовку кокиля при его заливке. Вначале кокиль наклоняется в сторону литника и производится заливка. Затем кокиль наклоняется в противоположную сторону, происходит перераспределение кристаллизующейся жидкой массы, в результате чего исключается образование концентрированных раковин в днище. Кроме того, улучшаются условия питания его из основной прибыли с наиболее горячим металлом.

Интересный способ литья в кокиль поршней из алюминиевого сплава с 18,0—22,0% Si описан в работе [125]. Для улучшения внутреннего строения сплава и повышения его свойств центральный клин 2 (рис. 133) подвергается воздействию ультразвуковых колебаний с помощью магнестрикционного преобразователя 1. При этом интерметаллиды и зерна кремния измельчаются в 5—10 раз и при этом значительно повышаются свойства сплава. Применение ультразвука при кристаллизации сплава известно уже давно, этот процесс хорошо исследован и преимущества его очевидны. Однако он еще не нашел достаточного распространения.

Литейщиками ГДР (пат. № 109338) предложена следующая технология литья поршней. Металл в кокиль подводится снизу. После заливки форма поворачивается на 180° и одновременно металл уплотняется в донной части и в бобышках с помощью специально устроенных пуансонов.

По патенту № 117375 (СССР) предлагается оригинальный способ повышения долговечности поршней компрессоров путем армирования тонкой стальной проволокой. Тонкая проволока из мартенситной дисперсионно твердеющей стали предварительно нагревается в печи с восстановительной атмосферой при 670 К и протя-

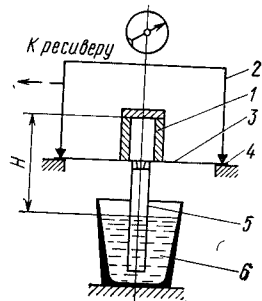


Рис. 134. Схема литья в кокиль вакуумным всасыванием:

1 — кокиль; 2 — колпак; 3 — плита; 4 — уплотнитель; 5 — металлопровод; 6 — расплав

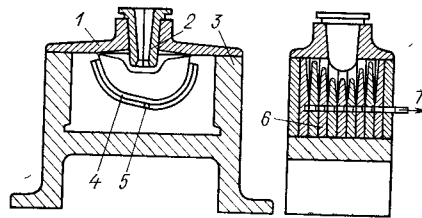


Рис. 135. Схема кокиля для получения ребренных и тонкостенных алюминиевых отливок с применением вакуума:

1 и 3 — верхняя и нижняя части кокиля; 2 — вставка литниковой воронки; 4 — воздушный канал; 5 — канал-коллектор; 6 — пакет пластин, образующих ребра; 7 — трубопровод к вакуум-насосу

гивается через алюминиевый расплав, в результате чего покрывается тонким его слоем и прессуется в пакеты, которые устанавливаются в кокиль и затем заливаются.

В последнее время, кроме изыскания новых и улучшения уже применяющихся сплавов, используют литье биметаллических поршней, что позволяет совместить положительные свойства алюминиевых и железоуглеродистых или других сплавов. Металлические вставки в полость формы изменяют тепловое поле, что необходимо учитывать при литье.

Другие примеры. К особым видам литья алюминиевых сплавов можно отнести литье в кокиль вакуумным всасыванием [82]. По этому способу кокиль 1 разогревали до 420 К и заливали жидким сплавом АЛ2 вакуумным всасыванием (рис. 134). Вакуум под колпаком 2 создавали с помощью ресивера, и металл за 6 с поднимался на уровень H и за 2—3 с заполнял полость кокиля диаметром 80 мм и высотой 120 мм. Выдержка под вакуум составляла 80—85 с. Исследования отливки показали, что ее плотность несколько выше плотности аналогичной отливки, полученной в обычном кокиле с прибылью высотой более $\frac{3}{4}$ высоты отливки.

Для получения плотных и с тонкими ребрами отливок предложено использование центробежной силы и вакуумирования при заливке кокиля [179]. Такие способы исключают недоливы, обеспечивая заполнение даже самых тонких сечений.

Использование вакуума дается на примере литья головок цилиндров с тонкими ребрами воздушного охлаждения (рис. 135). Ребра выполняются частями кокиля, собранными в виде пакета из отдельных пластин, в которых на расстоянии 10—15 мм от контура ребер профрезерованы воздушные каналы 4. Эти каналы связаны между собой поперечным круглым каналом 5, который соединяется трубопроводом 7 с вакуум-насосом. При заливке кокиля

происходит всасывание металла в тонкие (менее 3 мм) полости, оформляющие ребра отливки. Применение такого способа литья для головок цилиндра, имеющих тринадцать ребер, позволило снизить брак с 15 до 1%. При литье в кокиль тонкостенных деталей, имеющих внутренний стержень, вакуум используется для вывода газа из последнего.

Как особый следует отметить процесс литья в кокиль с кристаллизацией сплава под давлением поршня. Он применим для сравнительно несложных толстостенных отливок, не имеющих песчаных стержней. Этот способ обеспечивает повышение герметичности отливок и улучшение механических свойств металла.

Представляет интерес еще один особый вид литья в кокиль — литье с выливанием. Его используют для тонкостенных полых отливок. Состоит он в том, что металл, залитый в форму, выдерживают в ней до образования твердой корки заданной толщины, после чего остаток жидкого металла выливают. Изменяя толщину стенки кокиля, интенсивность теплоотвода, можно обеспечить получение равно- либо разностенных отливок. Этим способом можно получить отливки со стенками толщиной менее 2 мм. Для литья с выливанием применяют сплавы, кристаллизующиеся при постоянной или в очень узком интервале температур. Только в этом случае можно получить достаточно гладкую поверхность внутренней полости (см. гл. IV).

8. ВИДЫ БРАКА И СПОСОБЫ ЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ

Из-за металла в отливках могут образоваться следующие дефекты:

1) газовая пористость, причиной образования которой может быть увеличение содержания газов, растворенных в металле, и повышенная его температура при заливке;

2) шлаковые включения, являющиеся следствием применения при плавке загрязненных шихтовых материалов, некачественное рафинирование сплава и неполное время выстаивания его после процесса рафинирования и модифицирования;

3) несоответствие химического состава, что может быть результатом неправильной шихтовки, загрязнения шихты, неправильного ведения плавки, а также перегрева металла;

4) усадочные раковины, усадочная пористость, утяжины, недоливы, неспай из-за неправильного выбора температуры заливки.

Усадочные дефекты могут возникнуть также вследствие нарушения направленности затвердевания и недостаточного питания массивных узлов отливки. Усадочные дефекты нередки в местах, формируемых сильно разогретыми участками кокиля.

Причиной усадочных раковин при целевой литниковой системе может быть недостаточное сечение питателей. Металл в та-

ком питателе застывает раньше, чем разогретая часть отливки, и преждевременно запирает прибыль, препятствуя ей выполнять свою питающую роль.

Способы предупреждения усадочных дефектов подробно обсуждались в предыдущих разделах книги. Эффективность их определяется частными условиями литья и во многих случаях может быть оценена количественно (см. гл. IV).

Как указывалось (см. параграф 3), шлаковые включения и плены образуются также по пути движения жидкого металла из ковша в форму. Способы предотвращения этих дефектов рассмотрены в предыдущих параграфах. При этом отмечалась важная роль литниковой системы.

Однако коренное изменение литниковой системы в числе мер предупреждения включений и плен должно быть крайней мерой.

При литье деталей из алюминиевых сплавов появление брака во многом зависит от литниковой системы. Поэтому, выбирая литниковую систему, надежно предупреждающую один из видов брака, необходимо учитывать, какие изменения это внесет в процесс формирования отливок и какие новые пороки может породить подобное изменение. Так, первоначально в кокиле поршня была устроена щелевая литниковая система (рис. 136, а). Металл через литниковую чашу 1, питатель 2 и прибыль 3 попадал в полость формы через щелевой питатель. Такая система обеспечивала направленное затвердевание отливки, исключала образование усадочных дефектов. Кроме того, такое устройство чаши задерживало ранее образовавшиеся шлак и плены. Однако падение тонкой струи, всплески металла создавали благоприятные условия для их образования за «заградительной системой». В результате в верхней части отливки 5 образовывались пороки в виде шлаковых включений и плен 4.

Литниковая система была коренным образом перестроена (рис. 136, б), указанный брак исчез, но появился новый, не менее опасный — усадочные раковины в нижней части отливки, в местах, наиболее разогреваемых струей жидкого металла.

Недоливы и неспаи поражаются многими причинами: холодным металлом, низкой начальной температурой кокиля, медленной

заливкой, большой газотворностью стержней и красок и плохой вентиляции кокиля.

Устройство литниковых систем, ускоряющих заливку

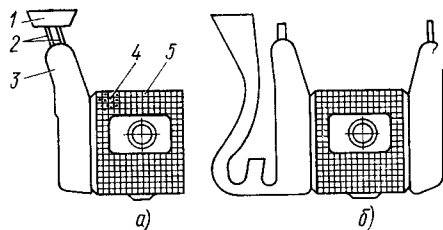


Рис. 136. Щелевая (а) и сифонная (б) литниковые системы кокиля поршня: 1 — чаша; 2 — питатель; 3 — прибыль; 4 — место включений шлака и плен; 5 — отливки

и обеспечивающих ламинарное течение металла в каналах литниковой системы, может быть весьма эффективным средством предупреждения недоливов и неспаев. Заполняемость можно также значительно улучшить соответствующей окраской, подогревом, вибрацией кокиля.

Снижение газотворной способности стержней (за счет подбора соответствующих смесей, прокаливания стержней и т. п.) во всех случаях благоприятно, и эта мера должна осуществляться раньше других. Хороший отвод газов из кокиля — также обязательное условие предупреждения не только недоливов, но и других видов брака. Что касается ускорения заливки, повышения начальной температуры кокиля, температуры заливки и снижения теплоаккумулирующей способности формы как мер предупреждения недоливов, то их использование без оценки вероятности появления других видов брака недопустимо.

1. СВОЙСТВА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Особенностью магниевых сплавов является малая плотность и сравнительно большая удельная прочность. Так, удельная прочность магниевых сплавов составляет от 12,8 [до 19,4, алюминиевого сплава АЛ4 — 8,6 — 10,0, высокопрочного чугуна — 6,9 — 7,6, углеродистой стали — 7,0—9,5, и легированной конструкционной стали — 10,2—12,3 кгс·см³/(г·мм²) [71].

Широкое распространение получили сплавы системы Mg—Al—Zn. К этой группе относятся сплавы Мл3, Мл4 п. ч., Мл5, Мл5 п. ч., Мл5 о. н. (ГОСТ 2856—68). Основным упрочнителем в них является алюминий. Для улучшения того или иного свойства в сплавы вводят дополнительно различные элементы. Так, марганец улучшает коррозионную стойкость, кальций повышает жаропрочность, бериллий снижает окисляемость сплавов.

Более высокими механическими свойствами отличаются сплавы группы Mg—Zn—Zr (Мл12) и особенно с редкоземельными элементами. Из редкоземельных металлов в качестве легирующих добавок чаще всего используются ниодим — сплавы Мл9 (ВМл2), Мл10; лантан — сплав Мл15; редкоземельные цериевой группы — сплав Мл11. Используют также торий и другие элементы.

Сплавы этой группы относятся к тепло- и жаропрочным с достаточно хорошей прочностью при комнатной температуре. Для литья в кокиль преимущественно используют сплавы Мл5, Мл6, Мл10, Мл12, Мл15.

Основные недостатки магниевых сплавов: их большая склонность к окисляемости в твердом и жидком состояниях и легкая воспламеняемость. Кроме того, они имеют сравнительно низкую жидкотекучесть, повышенную усадку и склонность к образованию горячих трещин (табл. 33). Большинство сплавов на магниевой основе (Мл4, Мл5 и др.) имеют значительный интервал кристаллизации. Последнее, одновременно с повышенным содержанием газов в металле и низкой его плотностью, приводит к образованию микрорыхлот (см. гл. IV) и к понижению свойств металла.

Магниевые сплавы (в своем большинстве) чувствительны к влиянию скорости охлаждения. Так, изменение толщины стенки отливки от 4—10 до 30 мм уменьшает величину предела прочности сплава с 215 до 150 МПа (21,5 до 15 кгс/мм²) и относительное удлинение с 7,5 до 3,5%. Повышение скорости затвердевания магниевых сплавов увеличивает их плотность, измельчает структуру и, следовательно, улучшает механические свойства.

Ввиду особых свойств магниевые сплавы нашли широкое применение для изготовления отливок различного назначения [94, 151]. Из них получают детали от самых простых и мелких до

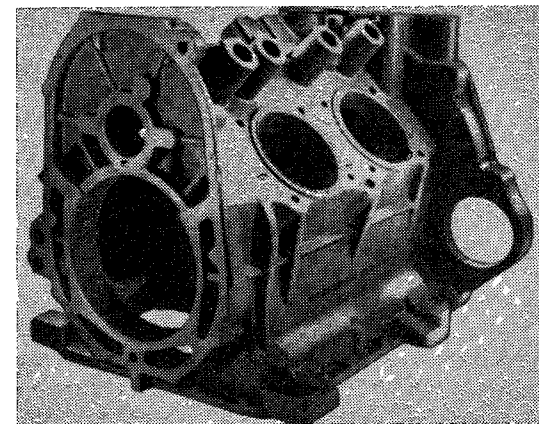


Рис. 137. Отливка «картер коленчатого вала», масса 8 кг

весьма сложных и крупных. Представление о сложности деталей из магниевых сплавов, отливаемых в кокиль, дает рис. 137.

Отливки, изготовленные в кокилях, не только обладают высокими эксплуатационными свойствами, но и имеют хороший внешний вид.

Одной из особенностей отливок из магниевых сплавов является повышенная их склонность к короблению при затвердевании и термической обработке. Поэтому рекомендуется конструировать отливки повышенной жесткости, для чего предусматривать ребра. При этом следует помнить о повышенной склонности магниевых сплавов к горячеломкости. Следовательно, устройство ребер должно быть таким, чтобы не вызывать торможение усадки кокилем.

Таблица 33

Литейные свойства основных магниевых сплавов, применяемых для литья в кокиль

Марка сплава	Система сплава	Линейная усадка, %	Жидкотекучесть по прутковой пробе, мм	Склонность к образованию горячих трещин (ширина кольца), мм	Склонность к образованию микрорыхлоты
Мл5	Mg—Al—Zn	1,0—1,2	290—300	30,0	Средняя
Мл6	Mg—Al—Zn	1,1—1,2	330	27,5	»
Мл12	Mg—Zn—Zr	1,2—1,4	290	30,3—32,5	»
Мл10	Mg—Nd—Zr	1,2—1,5	250	15—20	Малая
Мл15	Mg—Za—Zr	1,2—1,5	320	27,5—30	»

Рекомендации по проектированию отливок из магниевых сплавов (минимальная толщина и уклоны стенки, предельные значения длин отверстий, припуски на механическую обработку) изложены в гл. VIII. При проектировании необходимо руководствоваться и общими требованиями к литым конструкциям, приведенным там же.

2. ОСОБЕННОСТИ ЛИТЬЯ

Применение кокилей позволяет добиться значительного упрощения технологии производства и сокращения стоимости (примерно в 2 раза) отливок из магниевых сплавов. Прежде всего это объясняется отсутствием химического взаимодействия металла с формой. При заливке в песчаную форму магниевый сплав интенсивно реагирует с влагой, поэтому требуются специальные меры для предупреждения его окисления, что усложняет технологический процесс изготовления отливок. Однако литье в кокиль ввиду пониженных литейных свойств магниевых сплавов (низкая жидкотекучесть, высокие усадка и склонность к образованию горячих трещин) имеет свои сложности, которые проявляются в необходимости строгого регламентирования параметров технологического процесса.

При литье из сплава Мл5 тонкостенных отливок оптимальными являются значения $T_{\text{зал}} = 1000 \div 1020 \text{ К}$ и $T_{2\text{н}} = 670 \text{ К}$, а для простых толстостенных отливок $T_{\text{зал}} = 950 \text{ К}$ и $T_{2\text{н}} = 570 \div 620 \text{ К}$. По данным А. М. Осокина, при литье сплава Мл5 в кокили удается устранять горячеломкость отливок при $T_{2\text{н}} = 670 \text{ К}$ и $T_{\text{зал}} = 1070 \text{ К}$. При этих параметрах уменьшается отрицательное влияние большого интервала кристаллизации и появляется возможность залечивания образующихся кристаллизационных микротрещин.

Следует, однако, учитывать, что повышение температуры заливки приводит к интенсивному окислению сплава, загрязнению отливки окислами, увеличению размеров зерна и к ухудшению механических свойств. Поэтому считается более эффективным введение в расплав церия и висмута, благоприятно действующих на снижение горячеломкости [61].

Ввиду повышенной склонности магниевых сплавов к образованию трещин при затрудненной усадке необходимо обе-

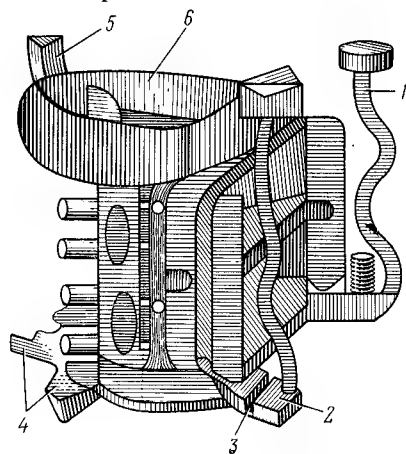


Рис. 138. Литниковая система картера: 1 — стояк; 2 — металлоприемник; 3 — рассекатель; 4 — подпитывающие бобышки; 5 — выпор; 6 — кольцевая прибыль

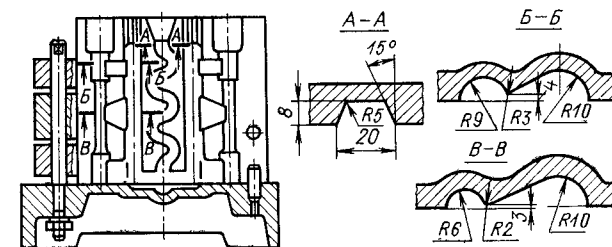


Рис. 139. Кокиль с вертикальными подпитывающими бобышками

спечить своевременный «подрыв» (извлечение) металлического стержня или применять песчаные стержни. Учитывая особенности литейных свойств рассматриваемых сплавов, следует широко применять верхние и отводные (боковые) прибыли совместно (рис. 138). Даже в литых образцах, предназначенных для испытания на разрыв (рис. 139), были достигнуты стабильные показатели механических свойств сплава Мл5 после применения специальных вертикальных подпитывающих бобышек [9].

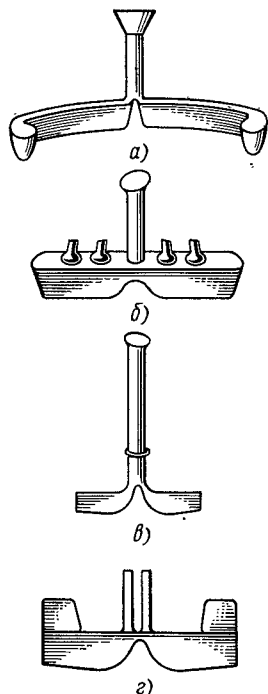
В работе [76] приводятся данные о влиянии на механические свойства и квазизотропность (однородность) сплава Мл5 модифицирования расплава магнетитом и воздействия ультразвуком в период кристаллизации в кокиле. Воздействие на расплав ультразвуком повысило механические свойства сплава Мл5 в центральной части слитка диаметром 80 мм и высотой 260 мм (масса слитка 2,15 кг) на 40—50%. Менее эффективно действует модифицирование.

3. ЛИТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Основным условием получения качественных отливок из магниевых сплавов является предупреждение окисления расплава и обеспечение его ламинарного движения в литейной полости формы. Завихрение потока магния на любом пути металла в кокиле может привести к образованию вторичного шлака, микронеплотностей и газовых раковин в отливках. Литниковые системы для магниевых сплавов чаще всего состоят из стояка, коллектора и питателей. Вместо зумпфов у основания стояка устраивают рассекатели (рис. 140). В некоторых случаях вместо коллектора устанавливают металлоприемник с рассекателем (см. рис. 138).

Стояки применяют трех видов — цилиндрические, плоские и змееобразные. Змееобразные распространены для крупных отливок. Цилиндрические и плоские стояки рекомендуется выполнять наклонными. В ряде случаев перед заливкой кокиль наклоняют в сторону стояка на 40—50° от вертикали и в таком положении начинают его заливку. По мере заполнения стояка сплавом форму

Рис. 140. Типы раскателей



постепенно возвращают в начальное положение. Такой способ обеспечивает плавное заполнение формы металлом независимо от габаритных размеров отливки. Он особенно целесообразен при литье отливок, имеющих большие горизонтально расположенные поверхности.

Питатели чаще всего применяют щелевые горизонтальные или вертикальные, реже рожковые. Целесообразно обеспечивать рассредоточенный подвод металла через несколько питателей во избежание местного перегрева, а также для более быстрого заполнения формы.

При литье магниевых сплавов применяют расширяющуюся литниковую систему, обеспечивающую более спокойное поступление металла в полость формы. Обычно рекомендуется соотношение элементов литниковой системы (стояка, коллектора и питателей) для мелких и средних отливок $F_{ст} : F_{кол} : F_{п} = 1 : 2 : 3$, а для крупных и сложных отливок $F_{ст} : F_{кол} : F_{п} = 1 : 3 : 6$.

Расчет литниковой системы начинают с определения площади сечения стояка (см²)

$$F_{ст} = \frac{M_1}{0,1\mu t_1 \sqrt{H}}, \quad (139)$$

где M_1 — масса отливки с литниковой системой и прибылями, кг; μ — коэффициент расхода, равный 0,7—0,8; t_1 — продолжительность заливки, с; H — средний металлостатический напор, см.

Продолжительность заливки вычисляют по формуле

$$t_1 = k \sqrt[3]{\delta_1 M_1}, \quad (140)$$

где k — коэффициент, зависящий от массы отливки; δ_1 — средняя толщина стенки отливки, мм.

Происхождение формулы (139) легко понять, если сравнить ее с выражением (135).

Как уже отмечалось, при литье магниевых сплавов необходимо использовать прибыли. Объем прибыли должен превосходить объем питаемого узла в 1,5—2 раза, форма прибыли зависит от конфигурации этого узла.

4. ПОДГОТОВКА И ЗАЛИВКА КОКИЛЕЙ

В основном эксплуатация кокилей при литье магниевых сплавов мало чем отличается от эксплуатации их при литье алюминиевых сплавов. Перед окраской поверхность кокиля тщательно очищают и нагревают до 470—530 К, после чего пульверизатором наносят краску.

В табл. 34 представлены некоторые составы красок.

Таблица 34

Состав (% по массе) краски для кокилей

Назначение	Прокаленный асбест	Борная кислота	Мел	Окись магния	Окись цинка	Тальк	Жидкое стекло	Вода
Для отливок сложной конфигурации	—	4,0	—	15,0	—	—	3,8	78,0
	—	3,0	—	—	15,0	—	3,0	79,0
	—	2,5	—	—	—	18,0	2,5	77,0
Для средних и мелких отливок	—	2,0	5,0	—	—	5,0	2,0	86,0
Для утепления литников и выпоров	15,0	4,0	10,0	—	—	—	3,0	68,0
Для окраски литников и выпоров	6,0	2,5	—	—	5,0	—	2,0	84,0
Для окраски литников и прибыли	25	—	20,0	—	—	—	6,5	100

Применяют краски и иных составов. Так, на Мелитопольском заводе «Автоцветлит» хорошо себя зарекомендовала краска, содержащая пирофиллит. Состав ее (% по массе): 13,5 — 15,0 пирофиллита; 4,5—5,0 талька; 1,8—2,0 жидкого стекла; 5,8—6,0 борной кислоты; воды — до плотности 1,12—1,2 г/см³.

Окрашенный кокиль собирают, подогревают до требуемой температуры и заливают. Для лучшего прогрева кокиля и высушивания краски используют теплоту первых двух-трех отливок, которые затем идут на передел.

При получении сложных отливок тепловой режим кокиля регулируют искусственным нагревом или охлаждением. В случае применения металлических стержней им необходимо уделить особое внимание (окраска, подогрев и охлаждение, своевременное извлечение из отливки).

Кроме тщательного проведения плавки с обязательным рафинированием, необходимо обеспечить защиту расплава от вторичного окисления при заливке. Для этого зеркало металла в ковше и кромки кокиля у литниковой чаши и выпора присыпают серным

цветом. Последний, сгорая, образует защитную атмосферу. Заливочный ковш перед каждым наполнением его металлом необходимо промывать в расплавленном и перегретом до 1020—1070 К флюсе.

Металлические чаши, через которые ведется заливка, предварительно окрашивают. Перед нанесением краски их нагревают до 420—470 К, а после окрашивания просушивают при 520—570 К. Для окрашивания литниковых чаш рекомендуются следующие краски (в % по массе): 1) 25 окиси цинка, 2,5 графита в порошке, 5,0 жидкого стекла и 67,5 воды; 2) 32,5 окиси цинка, 1,5 жидкого стекла и 66 воды.

Сплавы, легированные цирконием, заливают через фильтр. В качестве фильтра используют бой шамотного кирпича размером 10—15 мм. Бой, предварительно нагретый до ~1170 К, насыпают в чашу слоем от 80 до 150 мм в зависимости от массы заливаемого сплава.

Приготовление рабочих сплавов для литья в кокиль ничем не отличается от приготовления сплавов для литья в песчаные формы.

5. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ВИДЫ БРАКА

Термическую обработку отливок из магниевых сплавов применяют в основном с целью повышения их механических свойств; в некоторых случаях (для сложных, разностенных отливок) — для уменьшения внутренних напряжений. В первом случае используют искусственное старение, закалку и закалку с последующим старением, во втором случае — отжиг.

Вследствие медленного протекания диффузионных процессов в магниевых сплавах требуется длительное время нагрева отливок под закалку и старение для перевода различных фаз в твердый раствор. Кроме того, с целью уменьшения опасности окисления и оплавления отливок применяют двух- и трехступенчатый нагрев. Вначале ведут нагрев до более низкой температуры, при которой в твердый раствор переходят легкоплавкие составляющие, а затем производят нагрев и выдержку при повышенной температуре.

Продолжительность термообработки отливок, полученных в кокилях, примерно в 1,5—2,0 раза меньше, чем отливок, изготовляемых в песчано-глинистых формах. Это связано с тем, что в первом случае металл отличается мелкозернистой структурой, в результате чего диффузионные процессы протекают с большей скоростью. Например, для отливок из сплава Мл5, отливаемых в песчано-глинистые формы, требуется двухступенчатый нагрев под закалку. Первая ступень состоит в нагреве до 630 К и выдержки при ней в течение 3 ч, вторая ступень: нагрев до 690 К с выдержкой перед закалкой 21—29 ч. Для отливок из того же сплава, но отлитых в кокиль, достаточным является одноступенчатый нагрев под закалку до 688 К с последующей выдержкой в течение 8—16 ч.

Максимальное повышение прочности магниевых сплавов обеспечивается искусственным старением или закалкой с последующим старением. Одной закалкой достигается максимальная пластичность, что можно объяснить образованием однородного твердого раствора. Старение же приводит к выпадению из этого раствора различных упрочняющих фаз, снижающих пластичность.

В работе [94] приведены два режима термообработки сплава Мл5, модифицированного магнезитом. Первый режим (нагрев и выдержка 12 ч при 688 К (415° С) с охлаждением на воздухе) позволили исходные свойства $\sigma_b = 182$ МПа (18,2 кгс/мм²), $\sigma_t = 159$ МПа (15,9 кгс/мм²) и $\delta = 4,1\%$ изменить соответственно на 193, 103 и 8,5. Второй режим (выдержка 12 ч при 450 К (175° С) с последующим охлаждением на воздухе) позволил получить $\sigma_b = 211$ МПа, $\sigma_t = 157$ МПа и $\delta = 3,5\%$.

Отжиг обязательно применяют для отливок, которые не подвергаются другим видам термообработки.

При термообработке нагрев выше 575 К необходимо проводить в защитной атмосфере. По этой же причине не проводят закалку в воду. Ввиду малой скорости диффузии вполне достаточно охлаждение в струе воздуха. Иногда используют горячую (369 К) воду.

Основными видами брака отливок из магниевых сплавов при литье в кокиль являются: горячие трещины, недоливы, неспай, усадочные рыхлоты, газовые раковины, неметаллические включения и утяжины.

Горячие трещины образуются в местах резких переходов сечений отливки или в перегретых участках. Основные меры борьбы с трещинами прежде всего должны заключаться в соблюдении установленного темпа работы кокиля, в применении рассредоточенной системы питателей и в своевременном извлечении отливки из кокиля.

Неспай и недоливы могут быть связаны с низкой температурой заливаемого металла и кокиля. В этом случае необходимо экспериментально уточнить температуру заливки и температуру подогрева кокиля.

Рыхлоты и утяжины возникают в результате дефицита питания отливок. Чтобы предупредить этот вид брака, необходимо регулировать систему охлаждения кокиля, обеспечив равномерное или направленное затвердевание отливки. Для этого используют окраску (различной толщины) кокиля, его искусственное охлаждение или обогрев. Кроме этого, необходимо организовать хорошее питание массивных частей отливки, применять подвод металла через несколько питателей во избежание местного перегрева.

Газовые раковины преимущественно образуются в результате плохой подготовки сплава, недостаточной вентиляции формы, местного перегрева. Во избежание неметаллических включений следует прежде всего тщательно готовить сплав и вести заливку формы. В некоторых случаях требуется изменение литниковой системы.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СПЛАВОВ

В машиностроении медные сплавы — латуни и бронзы — получили широкое распространение. Литые латуни — многокомпонентные сплавы, в состав которых, кроме меди и цинка, входят один или несколько легирующих элементов: алюминий, никель, железо, кремний, марганец, олово, свинец. Легирующие элементы придают латуням специальные свойства или улучшают обычные (прочность, литейные свойства и пр.).

Структура латуни обычно состоит из α -твердого раствора цинка в меди; при наличии в ней более 30% Zn в структуре содержится кроме α -твердого раствора и β -твердый раствор, основой которого является химическое соединение CuZn. Увеличение содержания цинка приводит к увеличению в структуре сплава твердого раствора β , к повышению прочности и к снижению пластичности. Количество β -раствора увеличивается и при повышении скорости затвердевания отливки.

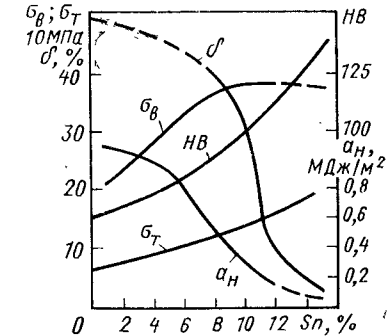
Латуни отличаются небольшим интервалом кристаллизации, что обуславливает их хорошую жидкотекучесть. Вместе с тем они имеют большую усадку: 1,6—2,5%, в зависимости от их химического состава (минимальная усадка у марганцовистых латуней, максимальная — у алюминиевых). Обычно латуни имеют малую склонность к образованию усадочной пористости, исключение составляют алюминиевые. Присутствие в латунях кремния увеличивает растворимость водорода и ухудшает качество отливок [109].

В качестве основных компонентов бронзы могут быть олово (оловянные бронзы) и алюминий (алюминиевые бронзы). Кроме этого, применяют марганцевые, кремнистые, бериллиевые, свинцовые, сурьмянистые и другие бронзы. Свойства каждого из сплавов определяются в основном количеством основного легирующего элемента. Зависимость механических свойств оловянной бронзы от содержания олова показана на рис. 141.

Оловянные бронзы имеют усадку в пределах 1,4—1,6% и относительно высокую жидкотекучесть. Жидкотекучесть понижается с повышением содержания олова; присутствие цинка, свинца, никеля увеличивает ее значение. Так, бронза Бр.ОЦ 10-2 имеет жидкотекучесть, равную 21 см, а бронза Бр.ОЦС 3-12-5 — 60 см. Вместе с тем оловянные бронзы, ввиду большого интервала кристаллизации, имеют повышенную склонность к образованию усадочной пористости. Увеличение скорости затвердевания отливки из оловянных бронз повышает их герметичность.

Свинцовые бронзы подвержены сильной ликвации вследствие особенностей кристаллизации, которая происходит в несколько

Рис. 141. Зависимость механических свойств оловянной бронзы от содержания олова



стадий и сопровождается расслоением расплава на два жидких слоя (монотектический процесс). Уменьшить и даже устранить ликвацию можно ускоренным затвердеванием отливки.

Алюминиевые бронзы дают плотные отливки (ввиду малого интервала кристаллизации), но имеют большую усадку и повышенную окисляемость в жидком состоянии, что объясняется большим сродством алюминия к кислороду.

Отливки из кремнистых бронз так же, как и кремнистых латуней, легко поражаются газовой пористостью, причиной этого является кремний. Увеличение количества свинца в кремнистых бронзах способствует получению более плотных отливок, но ухудшает их механические свойства.

В последнее время все более широкое распространение в электромашиностроении получают фасонные отливки из практически чистой меди с весьма малым количеством легирующих элементов (до 1,0%), повышающих ее прочность и улучшающих литейные свойства. Чистая медь, имея высокую электропроводность, отличается низкой прочностью и плохими литейными свойствами — низкой жидкотекучестью, значительной усадкой (1,8—2,0%), что способствует образованию трещин, усадочных раковин и пор в отливках. Кроме того, жидкая медь способна растворять большое количество газов, выделение которых при затвердевании вызывает образование газовых раковин и пористости. Окислы меди, растворяясь в расплаве, обогащают его кислородом, снижают электропроводность и ухудшают и литейные, и механические свойства металла.

Электропроводность меди снижается также при вводе некоторых элементов. Это необходимо учитывать при выборе легирующей добавки для улучшения механических и литейных свойств. Такими элементами, например, являются кадмий и хром. В сплаве меди с 0,6—1,0% Cd сохраняется 95% электропроводности и повышается прочность до 710 МПа (71 кгс/мм²). Ввод хрома до 0,5—0,7% снижает электропроводность на 20%, но значительно повышает прочность и жаропрочность. Однако эти присадки не устраняют повышенной склонности меди к образованию горячих трещин.

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА И КАЧЕСТВО ОТЛИВОК

Литье в кокиль медных сплавов обеспечивает повышение свойств металла, что объясняется особенностями затвердевания, кристаллизации и питания отливки в условиях ускоренного за-

твердевания (гл. II—IV). Так, например, бронза Бр. АЖ9-4 при литье в песчаные формы имеет $\sigma_{\text{в}} = 400$ МПа (40 кгс/мм²) и $\delta = 10\%$, а при литье в кокиль — 500 МПа (50 кгс/мм²) и 12% соответственно.

О повышении механических свойств оловянной бронзы при увеличении скорости затвердевания говорилось в гл. III (см. рис. 15 и 16) при обсуждении вопроса о комплексном параметре процесса кристаллизации.

Отливки из бронз со свинцом (Бр.ОЦС 4-4-17, Бр.АЖС 7-1,5-1,5 и др.) при замене песчаных форм кокилями значительно повышают антифрикционные свойства и износостойкость, что связано с резким измельчением включений свинца.

Некоторые медные сплавы (например, оловянные бронзы) при литье в кокиль настолько повышают свои свойства, что оказывается возможным заметно уменьшать в них дефицитные добавки.

Благотворно действует на структуру и свойства сплавов Cu—Sn—Ni повышение скорости затвердевания с одновременной добавкой алюминия: в этом случае свойства сплава в литом состоянии приближаются к свойствам термически обработанного, отлитого в обычных условиях (без алюминия и в песчаных формах).

О преимуществах литья в кокиль свидетельствует, в частности, тот факт, что латунные отливки могут устойчиво выдерживать давление свыше 30 кгс/см² только тогда, когда они отлиты в кокиле. Только при литье в кокиль можно обеспечить достаточную плотность отливок из оловянных бронз.

Уменьшение и полное устранение брака по газовым раковинам в отливках из кремнистой латуни возможно только при замене песчаных форм кокилями. Литье в кокиль не только позволяет снизить расход металла на заготовку, но и уменьшить толщины стенок готовых деталей (из-за более высоких свойств).

Таким образом, литье в кокиль сплавов на медной основе имеет явные преимущества перед литьем в разовые формы и целесообразность его применения очевидна. Однако необходимо помнить о некоторых особенностях этого процесса. Особенность литья в кокиль меди и ее сплавов обусловлены прежде всего низкими их трещиностойкостью. Для преодоления этого недостатка необходимы такие меры, как раскисление, модифицирование и рафинирование. Из-за трещин сложные тонкостенные латунные отливки весьма трудно получать в кокилях, однако тщательная обработка сплава фтористым натрием позволяет решать эту проблему [161].

Присадка легирующих элементов в сплавы меди с целью повышения служебных свойств часто вызывает одновременно снижение их трещиностойкости. Так как при литье в кокиль служебные свойства медных сплавов повышаются представляется воз-

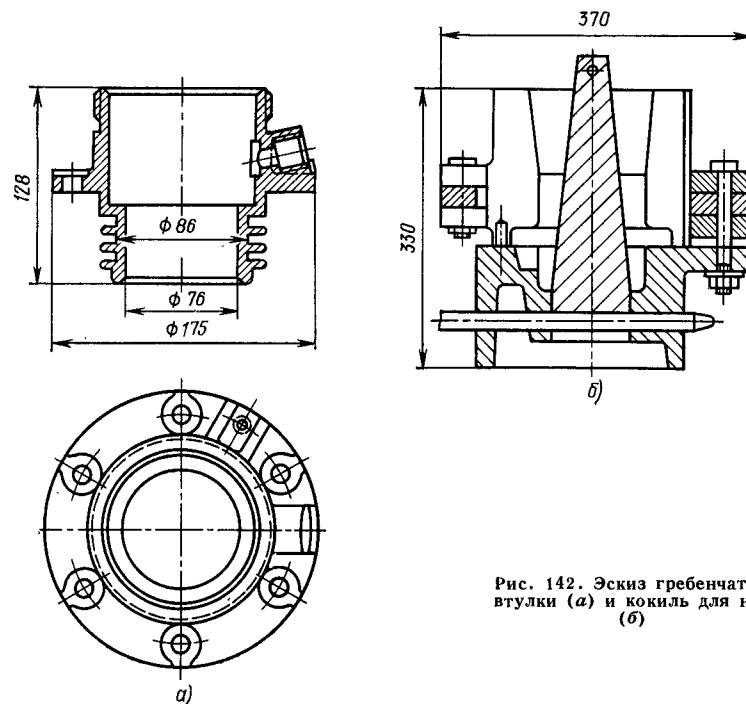


Рис. 142. Эскиз гребенчатой втулки (а) и кокиль для нее (б)

можность применять легирующие в меньших дозах и тем самым повышать трещиностойкость.

Для устранения ликвации в отливках из свинцовой бронзы, предупреждения пористости в отливках из латуни и оловянной бронзы необходимо применять процессы литья, обеспечивающие повышенную скорость затвердевания. Это достигается исключением песчаных стержней и вставок, охлаждением кокилей водой, применением высокотеплопроводных материалов для кокилей. Один из примеров литья бронзы с применением металлического стержня описан в работе [15]. На рис. 142, а представлен эскиз гребенчатой втулки из латуни ЛК 80-3Л с толщиной стенок до 5 мм. Получают ее в двухразъемном кокиле с центральным металлическим стержнем (рис. 142, б). Заливка производится через прилив высотой 100 мм.

По конструкции стержни могут быть самые различные и, в частности, — водоохлаждаемые. В работе [47] говорится об успешном использовании подобных стержней при литье деталей из оловянных бронз. Внутренние стенки полых стержней охлаждают водяным душем. При этом обращается внимание на следующую особенность: при раннем пуске воды стержень не успевает

прогреться, более поздний пуск воды вызывает трещины в отливках.

Особенность литья в кокиль медных сплавов состоит также в целесообразности использования специальных способов повышения скорости затвердевания отливок. Так, в работе [44] указывается, что литье в обычные кокили не обеспечивало получения здоровых отливок из свинцовистой бронзы с содержанием 9,0—11,0% Pb. Брак золотников по усадочной пористости и ликвации достигал до 60%. Была опробована технология литья намораживанием на водоохлаждаемый кокиль-кристаллизатор. Применение нового способа позволило сократить брак золотников до 3%.

3. ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ЛИТЬЯ

Литье втулок. Втулки — наиболее характерные отливки из сплавов меди; они, как правило, представляют собой детали ответственного назначения, для которых высокие плотность, износостойкость и прочность являются главными требованиями. Рассмотрим некоторые примеры.

Освоен процесс литья втулок наружного диаметра 320 мм, внутреннего — 160 мм, высотой 1200 мм из бронзы Бр. АЖ 10-3-1,5. Стержни для них изготавливаются из цельнотянутых труб толщиной 5—10 мм [78].

Интересный способ литья в кокиль втулок и полувтулок больших диаметров из бронзы Бр. ОЦС 5-5-5 приведен в работе [155]. Диаметр втулок более 400 мм, высота до 1000 мм. Для предупреждения усадочной пористости на внутренней поверхности втулок применен металлический стержень (рис. 143). Стержень полый, состоит из трех или четырех собранных вместе секторов. Полости между секторами засыпают формовочной смесью, а зазоры между секторами заделывают быстросохнущим составом.

Один из видов податливых стержней показан на рис. 144. Стержень состоит из трех частей: центральной части 3 в виде трапеции и двух боковин 4, которые разжимаются разрезными коль-

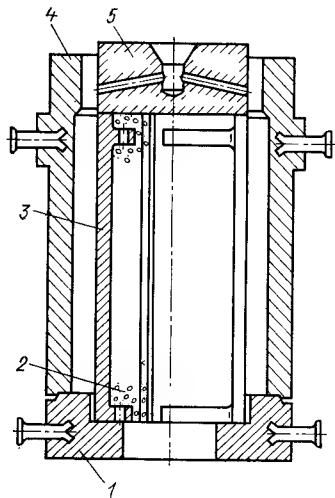


Рис. 143. Эскиз кокиля для литья крупных втулок:
1 — поддон; 2 — формовочная смесь; 3 — стержень; 4 — корпус кокиля; 5 — литниковый стержень

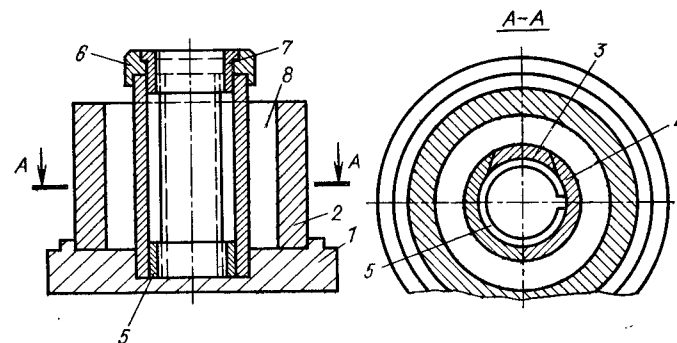


Рис. 144. Схема устройства податливого металлического стержня:
1 — плита; 2 — корпус кокиля; 3 — центральная часть стержня; 4 — две боковины; 5—7 — разрезные кольца; 8 — обойма

цами 5 и 7. Стержень фиксируется внизу в гнезде плиты 1 кокиля, а сверху — в обойме 8. При затвердевании и усадке отливки 8 боковины 4 стержня сжимаются и выталкивают центральную часть 3, отчего стержень и делается податливым. На разборку и сборку такого стержня затрачивается не более 3 мин.

В отливках типа втулок используют простые литниково-питающие системы, например дождевую, если высота отливки не очень большая. Для более высоких втулок рекомендуется сифонная литниковая система. При условии $l : d > 10$ (l — высота, d — диаметр отливки) вертикальное расположение отливки в кокиле может быть заменено горизонтальным.

Литье фасонных отливок. Литье в кокиль широко и эффективно используют для изготовления из медных сплавов различных фасонных (в основном арматурных) отливок. При серийности мелких арматурных отливок около 10 000 шт. их выгоднее изготавливать в кокилях, чем литьем под давлением. И лишь для серий по 20 000 отливок более экономичным оказывается литье под давлением.

4. ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ЗАЛИВКА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

В настоящее время используют различные покрытия кокилей. На Череповецком металлургическом заводе им. 50-летия СССР, например, при литье медных головок кислородных фурм применяют покрытие следующего состава, %: 26 лака ПВБ; 26 гидролизного спирта, 48 графита. Плотность краски — 1,12—1,14 г/см³; наносят ее через две заливки и получают отливки с чистой поверхностью [149].

Могут быть рекомендованы покрытия кокилей для латуней и бронз, состоящие из органического или водного растворителя — 100%, термореактивной смолы — 2—5% (сверх 100%) и огнеупорного порошка (ZrO_2 , MgO , Al_2O_3 , диатомит) — 8—15% (сверх 100%),

По данным работы [117], при литье в кокили деталей из бронз Бр.ОЦС6-6-3, Бр.ОФ 10-1, Бр. АМц 9-2, Бр. АЖ 9-4 применение в качестве защитного покрытия консистентной смазки ЦНИИТМАШ-201 дало хорошие результаты: отливки получались без пор, раковин и свищей. Наносят смазку слоем 0,3—0,8 мм. Расход ее составляет приблизительно 500 г на 1 т отливок. Такое покрытие может быть рекомендовано как для оловянных, так и для безоловянных бронз.

Для отливок из сплава на медной основе применяют различные виды термической обработки: отжиг для снятия напряжений, гомогенизирующий отжиг для получения однородной структуры и свойств, закалку с последующим отжигом, а также смягчающий отжиг с целью изменения механических свойств. Отливки, полученные в кокилях, в большей мере, чем заливаемые в песчаные формы, нуждаются в выравнивании структуры и снижении напряжений.

Виды и режимы термической обработки для различных сплавов различны. Для латуней используют гомогенизирующий отжиг, проводимый по режиму: нагрев до температуры примерно на 50 град. ниже температуры солидуса и выдержка при этой температуре в течение 4—6 ч.

Отжиг латуней для снятия напряжений производится при 530—570 К с выдержкой 2 ч и последующим медленным охлаждением с печью. Свойства кремнистой латуни можно значительно повысить термообработкой, состоящей из нагрева до 1020—1030 К (750—760° С), выдержки при этой температуре 1,0—1,5 ч, охлаждении с печью до потемнения и дальнейшего охлаждения на воздухе. В этом случае предел прочности при растяжении увеличивается до 410 МПа (41 кгс/мм²), а относительное удлинение — до 38% против 390 МПа и 17% соответственно до термообработки.

Отливки из оловянной бронзы, которые отличаются резко выраженной дендритной структурой, подвергают гомогенизирующему отжигу при температуре 920—1020 К. Отжиг для снятия напряжений проводят при 470 К в течение 10—20 ч. Кроме того, для этих бронз термическая обработка может быть использована с целью уменьшения пористости. Рекомендуется следующий режим: нагрев до 870—950 К в течение 4—6 ч, выдержка при этой температуре 1—3 ч и дальнейшее охлаждение с печью.

Отливки из алюминиевых и кремнистых бронз, кроме гомогенизирующего отжига для снятия напряжений, можно подвергать термообработке с целью улучшения механических свойств — закалке с последующим отжигом. Значительное улучшение механических свойств в результате термической обработки наблюдается у бериллиевой бронзы. Чаще всего обработка состоит из нагрева до 1070 К, выдержки в течение нескольких часов для получения однородного твердого раствора и охлаждения в воде; после этого отливки подвергают старению при температуре около 670 К.

1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ

Особенности рассматриваемой технологии связаны, прежде всего, с необходимостью нанесения на кокиль облицовки для получения каждой очередной отливки. Облицовочный состав наносят по модели, путем заполнения зазора между рабочими поверхностями модели и кокиля. Способы заполнения зазора составом, режим отвердевания последнего, методы очистки кокилей от остатков отработанной облицовки, подготовка оснастки к нанесению облицовки, способы и устройства для подачи облицовочного состава в зазор между моделью и кокилем зависят от свойств облицовочной смеси.

Облицовки из жидкоподвижных смесей чаще всего получают заливкой через отверстия в кокиле, реже — выжиманием с помощью модели, погружаемой в кокиль с налитым составом. Для нанесения облицовки из пластичных и сыпучих смесей используют все разновидности пескодувного процесса.

С целью обеспечения равномерности уплотнения облицовочного состава иногда применяют различные дополнительные воздействия: вакуумирование полости между моделью и кокилем, встряхивание (вибрирование) оснастки и др.

Как указывалось в гл. VI, наиболее широкое применение нашла сыпучая термотвердеющая песчано-смоляная смесь. Близкая к нулю прочность такой смеси в исходном состоянии в сочетании с пескодувным процессом позволяет стабильно получать относительно тонкую облицовку на кокилях практически любой конфигурации. Твердеет смесь за счет теплоты нагретой оснастки. На рис. 145 показаны схемы нанесения облицовки на кокили вдуванием смеси через отверстия в теле кокиля (а) и через щелевой зазор между кокилем и моделью (б).

Для отливок массой до 200 кг преимущественная толщина слоя облицовки равна 4—6 мм. Необходимость ее утонения или утолщения определяется задачей локального управления условиями охлаждения элемента отливки. Заданная толщина облицовки обеспечивается величиной зазора между кокилем и моделью в собранном состоянии.

Технологический процесс литья в кокили с термотвердеющей облицовкой начинается с подготовительных работ — нагрева модели и кокиля и нанесения на модель разделительного состава, предотвращающего прилипание облицовки к модели. Затем выполняют операции, необходимые для каждой заливки металла: установка кокиля на модельную плиту с моделью, вдувание смеси, ее отвердевание, съём облицованного кокиля с модели, сборка и заливка кокиля, охлаждение отливки в форме, разборка кокиля

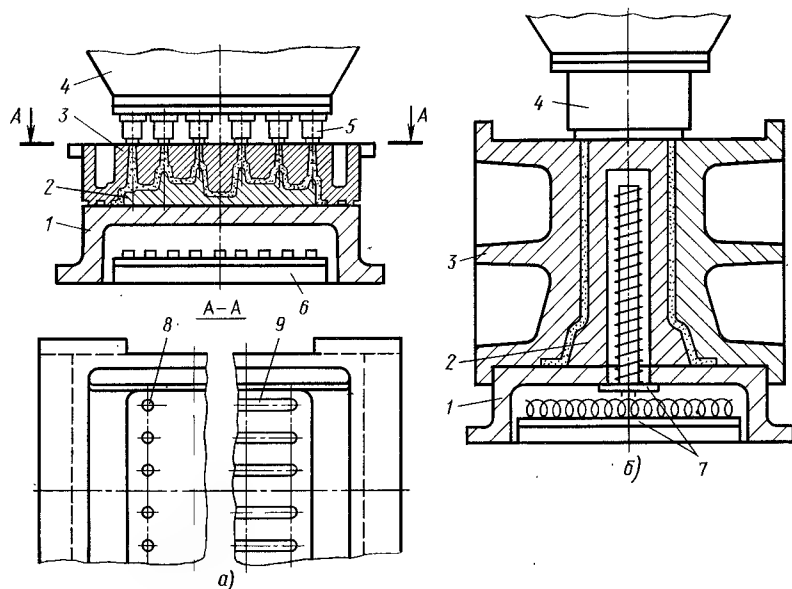


Рис. 145. Схема нанесения облицовки пескоструйным способом через отверстие в теле кокиля (а) и через щелевой зазор между моделью и кокилем (б): 1 — модельная плита; 2 — модель; 3 — кокиль; 4 — пескоструйная головка; 5 — сопло; 6 — газовый нагреватель; 7 — электрический нагреватель; 8, 9 — вдувные отверстия

и извлечение из него отливки, очистка кокиля от остатков частично выгоревшей облицовки и, наконец, охлаждение кокиля до температуры, необходимой для очередного нанесения облицовки. Кроме операций, непосредственно связанных с подготовкой и заливкой облицованных кокилей, технология включает изготовление облицовочной смеси и общие для литейного передела операции: шихтовку, плавку и финишную обработку и др.

Преимущества и недостатки. Теоретический анализ, экспериментальные исследования и промышленный опыт показывают, что двухслойные формы в виде облицованных кокилей, состоящие из внутреннего неметаллического и наружного металлического слоев, позволяют достичь экономичного решения ряда важных технических задач. Благодаря небольшой толщине неметаллического слоя облицованных кокилей по сравнению с обычными формами требуется значительно меньший объем песчаной смеси. Для отливок ответственного назначения становится экономически целесообразным применение высококачественных и дорогих формовочных материалов; в результате повышается качество поверхности отливок и уменьшается брак. Наличие металлической опоры уменьшает деформацию песчаного слоя, благодаря чему увеличивается точность отливок. Большая жесткость двухслойных форм способ-

ствует уменьшению усадочных пор и повышению плотности чугуновых отливок. Появляется возможность активно воздействовать на тепловые условия формирования отливки. Так, изменяя толщину неметаллического и металлического слоев, можно замедлять охлаждение одних частей отливки (относительно тонкие стенки, прибыли) и ускорять охлаждение других (относительно более толстые стенки, части чугуновых отливок, которые должны иметь повышенную твердость, и т. д.). Влияние толщины облицовки на процесс охлаждения отливки в кокиле иллюстрируется рис. 7 и 10.

В свете идей и выводов, изложенных в гл. II—IV, ясно, что в облицованном кокиле существуют особые возможности управления процессами структурообразования и питания отливки, а также резкого уменьшения в ней термических напряжений. Здесь уместно напомнить, что тепловые процессы влияют на газовый режим формы, образование пригара и другие явления. Математический аппарат указанных глав позволяет произвести количественный анализ влияния различных факторов и расчетным путем выбрать основные параметры технологии.

Вследствие значительно большего термического сопротивления толстослойного покрытия по сравнению с тонкослойным термическая нагрузка на облицованный кокиль резко уменьшается. Появление на поверхности кокиля трещин и некоторое его коробление существенных изменений в технологический процесс не вносят: рабочая поверхность формы полностью восстанавливается при очередном нанесении облицовки. Таким образом, при прочих равных условиях стойкость облицованных кокилей неизмеримо выше, чем обычных. Более того, применение облицованных кокилей становится экономически эффективным, когда литье в обычные кокили нецелесообразно из-за низкой их стойкости. Примерами в этом отношении служат процессы литья коленчатых валов и почти всех стальных фасонных отливок.

Особого внимания заслуживает вопрос о геометрической точности отливок, полученных по новой технологии. В облицованных кокилях отливали различные по массе и геометрической сложности отливки из чугуна и стали: чугуновые коленчатые и распределительные валы, станины электродвигателей, корпуса распределителей, стальные буксы железнодорожных вагонов и крышки к буксам, звенья цепи, звездочки ведущие и др. Масса перечисленных отливок составляла 1,5—120 кг. Отливали их, как правило, в многоступенчатых формах. В результате статистической обработки обмеров и взвешивания отливок в НИИСЛе получены данные, приведенные в табл. 35. Там же для сравнения приведены материалы, заимствованные из работы [103], о точности отливок, полученных другими способами литья. Как видно, новая технология позволяет получать отливки повышенной размерной и массовой точности.

При этом процессе размерная точность не падает с увеличением размеров отливки, в то же время при других процессах с ростом

Т а б л и ц а 35

Сравнительные данные геометрической точности отливок

Показатели	Машинная формовка встряхиванием	Формовка прессованием под высоким давлением	Литье в оболочковую форму	Литье по выплавляемым моделям	Литье в облицованный кокиль
Размерная точность (класс по ОСТу)	8—11	9—10	9—11	7—10	7—9
Точность по массе, %	4—25	2—7	7—18	5,5—8,5	3—5

габаритных размеров и массы отливки ее размерная точность уменьшается. Таким образом, чем крупнее отливка, тем ощутимее превосходство технологии литья в облицованные кокили.

Повышение геометрической точности отливок, полученных в облицованных кокилях, объясняется большой прочностью и жесткостью при заливке и существенно меньшим снижением этих качеств облицованного кокиля в период нагрева отливкой по сравнению с неметаллической формой (песчаной объемной, оболочковой разъемной и неразъемной). Это подтверждается сравнением данных о точности отливок, полученных в оболочковых формах и в облицованных кокилях. Действительно, в сравниваемых случаях все факторы точности, кроме жесткости и прочности формы, по существу одинаковы.

К недостаткам рассматриваемого процесса относятся: повышенная сложность и стоимость оснастки, затрудненная переналаживаемость специального технологического оборудования и оснастки, ограниченность номенклатуры одновременно отливаемых деталей в одном технологическом потоке. Облицованный кокиль, хотя и обладает некоторой податливостью, однако по этому свойству явно уступает обычным сырым песчаным и тем более оболочковым формам. Это обстоятельство необходимо учитывать при производстве тонкостенных крупногабаритных отливок, усадка которых затруднена формой.

Область применения. На основании опыта разработки технологии литья в облицованные кокили различных деталей и полученных при этом технико-экономических результатов можно очертить область наиболее эффективного использования этой технологии. Здесь следует подчеркнуть, что кокили представляют собой не универсальную оснастку. Параметры рассматриваемой технологии (включая нанесение облицовки) регламентируются в узких пределах, поэтому частые смены оснастки и связанные с ними нарушения ритмичности нежелательны. Исходя из этого, целесообразно использовать облицованные кокили при массовом производстве отливок. Вместе с тем, следует отметить, что имеется

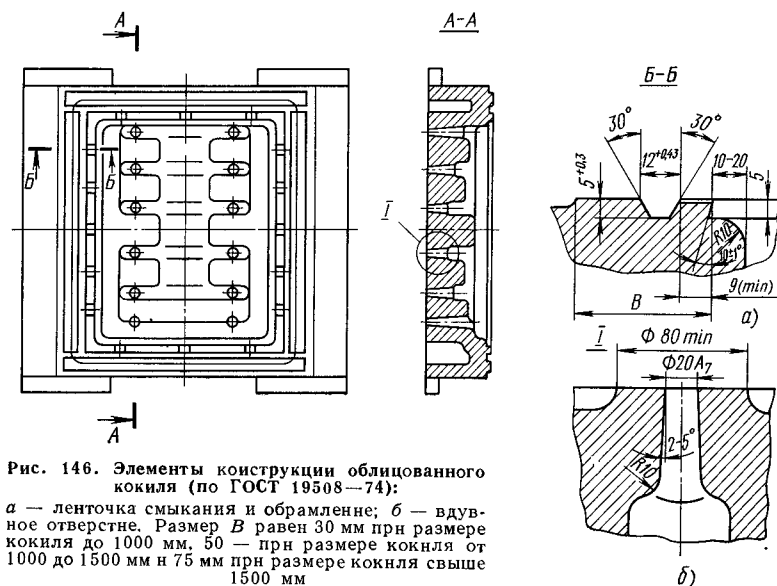


Рис. 146. Элементы конструкции облицованного кокиля (по ГОСТ 19508—74):

а — ленточка смыкания и обрамление; б — вдувное отверстие. Размер В равен 30 мм при размере кокиля до 1000 мм, 50 — при размере кокиля от 1000 до 1500 мм и 75 мм при размере кокиля свыше 1500 мм

положительный опыт использования в отдельных случаях облицованных кокилей и при мелкосерийном производстве.

Облицованные кокили могут найти применение при литье деталей авто- и тракторостроения, электротехнической промышленности, транспортного машиностроения и т. п. Технологию получения отливок в облицованных кокилях можно рекомендовать, прежде всего, для получения отливок повышенной точности, при большом объеме их механической обработки, при литье сплавов, имеющих повышенную склонность к усадке. В этих случаях наиболее полно реализуется преимущество облицованных кокилей. Здесь уместно подчеркнуть, что имеющийся производственный опыт литья в облицованные кокили ограничивается в основном получением отливок массой до 200 кг.

Оснастка. Конструкция и материал модельной оснастки для нанесения облицовки зависят от свойств облицовочного состава. В частности, при использовании термотвердеющей песчано-смоляной смеси она аналогична применяемой в производстве отливок в обычных оболочковых формах.

Для получения фасонных отливок используют, как правило, разъемные кокили, длина и ширина которых значительно больше, чем высота (рис. 146). Такие формы могут быть цельными и составными. Составные представляют собой раму, в которую с компенсационным зазором вставляется вкладыш, оформляющий рабочее гнездо. Составные конструкции характеризуются более высокой

стойкостью из-за меньших напряжений и деформаций. В отечественной практике для получения сложных фасонных отливок применяют толстостенные кокили (40 мм и более). Для подобных, но мелких отливок известен, однако, опыт использования тонкостенных кокилей.

Конструкция и размеры элементов спаривающих устройств для установки кокилей на модельные плиты и соединения между собой частей разъемных кокилей регламентированы ГОСТ 19509—74—ГОСТ 19516—74.

Число отверстий в кокиле для вдува сыпучей песчано-смоляной смеси определяется подетальной технологией отливки. Вдувные отверстия рекомендуется располагать над выступающими частями модели. При небольших перепадах высот между различными частями модели вдувные отверстия располагаются с шагом 150—250 мм. Размеры вдувных отверстий определены ГОСТ 19507—74 (рис. 146, б). Облицовочная смесь может наноситься также через щелевые отверстия 9 (см. рис. 145).

Шероховатость литой поверхности рабочего гнезда кокиля бывает недостаточной для удержания облицовки. Поэтому рекомендуется наносить на поверхности рабочего гнезда насечки и канавки. Этой же цели служит обратный уклон на ленточке смыкания (рис. 146, а). Ленточка смыкания представляет собой продолжение облицовки, выходящее на поверхность соприкосновения кокиля и модельной плиты. Основное назначение ленточки смыкания — ликвидация неплотности облицовки по контуру рабочего гнезда формы. Размеры ленточки смыкания регламентированы ГОСТ 19508—74.

Поверхность, по которой кокиль контактирует с модельной плитой по периферии кокиля, называется обрамлением. Его минимальная ширина установлена ГОСТ 19508—74 (рис. 146).

Нанесение песчано-смоляной облицовки из сыпучего состава. Опытами нанесения облицовки при вдуве смеси под постоянным давлением в пескодувной головке, снабженной управляемым соплом, установлено существование области оптимальных давлений воздуха и толщин облицовки. Исследования проводили со смесью кварцевого песка К016Б, ГОСТ 2138—74, плакированного новолачной фенолформальдегидной смолой при содержании последней 2%. Качество облицовки оценивали по ее массе, отнесенной ко всему объему полости, в которую смесь вдували. Все опыты проводили при температурах модели и кокиля 470 К. Как видно из рис. 147, повышение избыточного давления воздуха в головке от 0,2 до 0,6 МПа повышает плотность облицовки, если $X_{об}$ не более 4—5 мм; при большей толщине облицовки повышение давления малоэффективно.

Большое влияние на плотность облицовки оказывает система вентиляции полости, заполняемой смесью. Для вывода воздуха

из полости в кокиле выполняют вентиляционные каналы. Каналы представляют собой, преимущественно, щели (размеры по ГОСТ 16250—70), расположенные вокруг рабочего гнезда в поверхности разьема кокиля. Щелевые каналы объединяют в вентиляционные коллекторы (см. рис. 146). Конструкция и размеры последних регламентированы ГОСТ 19508—74. Если щели нельзя вывести к краю кокиля, то их подводят к специальному сквозному отверстию в кокиле. Для вентилирования глубоких полостей применяют вентиляционные пробки. Размеры отверстий для пробок установлены ГОСТ 16250—70, а конструкция и размеры пробок — ГОСТ 16251—70 и ГОСТ 16252—70.

Операция отверждения смеси является важной как с точки зрения качества формы, так и производительности оборудования для нанесения облицовки. Отверждение смеси на фенолформальдегидном связующем новолачного типа имеет сложную физико-химическую природу. Этот процесс зависит от теплообмена в системе модель — облицовка — кокиль, скорости сшивки линейных молекул смоляного связующего в пространственные структуры и газообразной среды, в которой происходит структурирование.

На рис. 148 приведены экспериментальные данные продолжительности отвердевания песчано-смоляных облицовок в зависимости от температур модели (цифры у кривых) и кокиля.

Термический цикл облицованного кокиля. Из природы кокилей, облицованных термотвердеющими смесями, вытекает необходимость определенной организации их термического цикла. Задача эта более сложная, чем при литье в обычные кокили (приходится учитывать не только условия формирования отливки, но и особые условия формирования облицовки). Термический цикл должен быть организован таким образом, чтобы обеспечить заданную начальную температуру кокиля перед заливкой металла

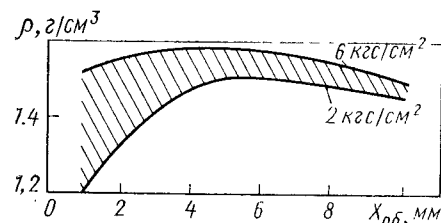


Рис. 147. Влияние давления воздуха в пескодувной головке и толщины облицовки на ее плотность

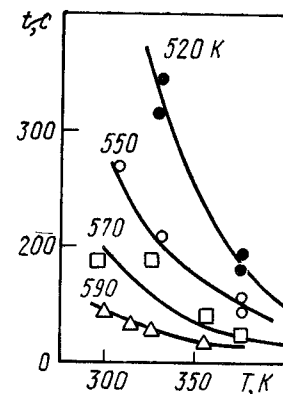


Рис. 148. Экспериментальный график для определения продолжительности отверждения облицовки на фенолформальдегидном связующем

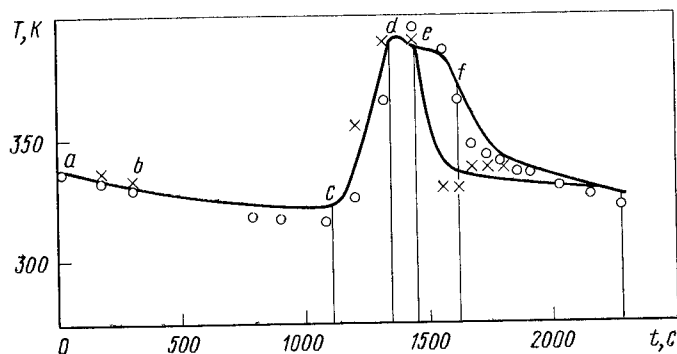


Рис. 149. Термический цикл облицованного кокиля (линии — расчет по формулам работы [140]; точки — экспериментальные данные)

и установкой на модель. Этапы термического цикла определяются технологическими факторами (формированием облицовки и отливки, охлаждением или нагревом кокиля до температуры, заданной по условиям формирования облицовки), возможностью осуществления машинных (например, транспортных) операций и организационными факторами (установка стержней в форму и т. д.).

Расчет термического цикла облицованного кокиля начинается с определения термических параметров центральных операций — формирования облицовки и отливки. Затем находят изменение температуры кокиля на этапах сборки формы, ожидания заливки и подготовки к нанесению облицовки. Соответствующие расчетные формулы и приведены в работе [140].

На рис. 149 в качестве примера показан термический цикл стального кокиля массой 240 кг. Металлоемкость формы 15,6 кг, материал отливки — чугун. Температура кокиля T_2 после нанесения на него облицовки составляет 435 К (точка *a*). В течение 300 с (до точки *b*) — охлаждение кокиля при сборке, а затем — при ожидании заливки (до точки *c*). После заливки температура кокиля повысилась до 488 К (точка *c*). Затем при разборке формы и очистке ее от остатков облицовки произошло некоторое снижение T_2 (точка *e*). Далее в интервале *ef* началось принудительное охлаждение полугокилей: водовоздушной смесью со стороны рабочей поверхности и естественным образом по остальным поверхностям. За этот период температура на рабочей поверхности понизилась до 433 К, а на тыльной — до 471 К. Последующее охлаждение осуществлялось в естественных условиях.

Очистка кокиля от остатков песчано-смоляной облицовки. Прочистка вдувных отверстий осуществляется штырями-толкателями. Для уменьшения усилия выталкивания отверстия делают с уклоном 2—5° (см. рис. 146). Аналогичный результат достигается,

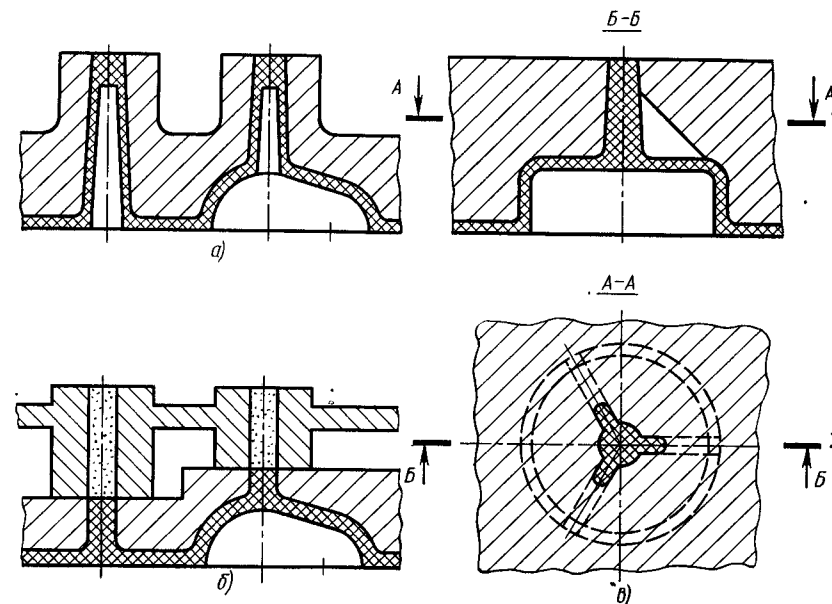


Рис. 150. Конструкции пробок во вдувных отверстиях кокиля: *a* — полая пробка; *б* — укороченная пробка с помощью промежуточной плиты; *в* — ребренная пробка

если смесь, затвердевшая во вдувном отверстии, или «пробка», имеет внутри пустоту (рис. 150, *a*) и если часть отверстия оформляется промежуточной плитой (рис. 150, *б*) (А. с. № 388836 и 373086). Дополнительное снижение усилия прочистки дает окрашивание отверстий раствором СКТ в уайт-спирите, а также водной суспензией талька, мела, маршалита и известняка.

Отработанная облицовка частично удаляется при прочистке вдувных отверстий. Поэтому рекомендуется располагать эти отверстия в зонах выступающих и углубленных частей кокиля, преимущественно не соприкасающихся с металлом (например, на знаковых частях стержней). Если во вдувном отверстии дополнительно выполнить пазы (А. с. № 395168), то можно при выталкивании пробки удалить значительную часть облицовки (рис. 150, *в*).

Для очистки фигурной полости кокиля в условиях комплексно-механизированных и автоматических линий применяют дробетный способ или обдув сжатым воздухом. Для первого способа требуются сложные установки. При обдуве сжатым воздухом возникает необходимость скалывания ленточки смякания механическим путем. Для этого применяют механическое устройство. Опыт

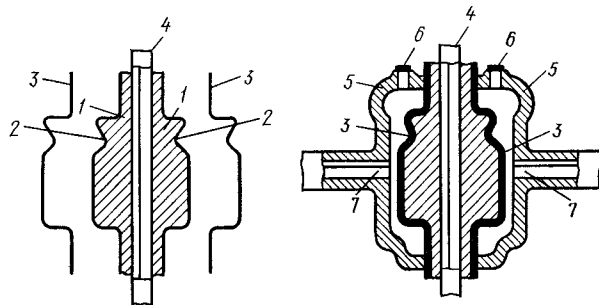


Рис. 151. Схема формирования облицовки из сыпучего материала на основе V-процесса: 1 — модель; 2 — рабочая поверхность модели; 3 — пленка; 4 — труба для присасывания пленки к поверхности модели; 5 — кокиль; 6 — отверстие с заглушкой для подачи зернистого формовочного материала; 7 — труба для вакуумирования полости облицовки

очистки кокилей сжатым воздухом показал, что качество очистки повышается при импульсной подаче воздуха.

Особая разновидность облицовочного кокиля. В 1971 г. в Японии предложен принципиально новый способ изготовления форм: на модель наносится пленочный легкодеформируемый материал, устанавливается опока, пространство между пленкой и опокой заполняется сыпучим формовочным материалом, в поровом пространстве зернистого наполнителя создается вакуум и, наконец, модель извлекается из формы. Ясно, что плотная упаковка песчинок и конфигурация рабочего гнезда формы сохраняются вследствие разности давлений вне и внутри порового пространства сыпучего формовочного материала. Описанный способ изготовления форм получил название V-процесса. Если толщина песчаного слоя мала и опока имеет дно, конфигурация которого отображает контур модели, то получаемая при этом литейная форма представляет собой, по существу, облицованный кокиль (рис. 151).

2. ЛИТЬЕ ЧУГУНА

Закономерности формирования структуры. Свойства чугуна определяются главным образом его микроструктурой. К числу определяющих факторов структурообразования относятся условия затвердевания и охлаждения затвердевшей отливки. Охлаждение отливки в высокотемпературной области регламентирует первичную кристаллизацию, а охлаждение в низкотемпературной — перекристаллизацию. Из этого следует, что особенности формирования микроструктуры чугунной отливки в облицованном кокиле проявляются в той мере, в какой изменяются условия ее затвердевания и последующего охлаждения. При $X_3/X_1 < 1$ влияние кокиля проявляется в течение всего периода пребывания

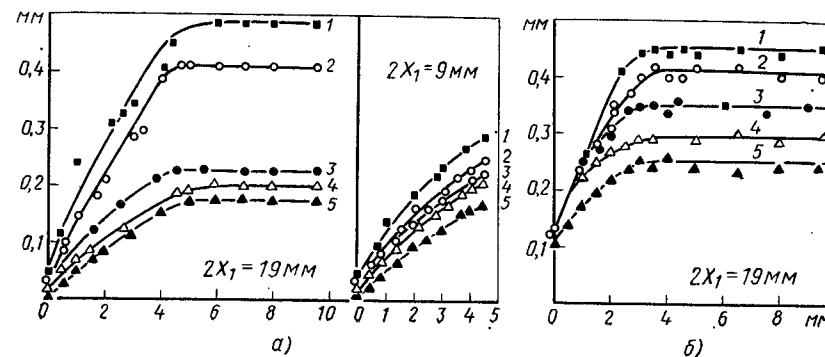


Рис. 152. Изменения длины пластинок графита по толщине стенки чугунной отливки при различной толщине облицовки:

а — средние значения по серии плавов; б — средние значения по одной плавке; кривые 1—5 — толщина облицовки соответственно 10, 8, 6, 4 и 2 мм

отливки в форме. Чугунная отливка затвердевает в двухслойной форме так же, как и в обычной песчаной, если $X_3/X_1 > 2$ [20]. Ясно, что при толщинах облицовки, соизмеримых с X_1 , захлаживающее влияние кокиля проявляется в основном в низкотемпературной области формирования микроструктуры отливки. Обратимся к экспериментальным данным.

В статье [183] приведены результаты обширных исследований влияния толщины облицовки на кристаллизацию серого чугуна. Опыты проводили при заливке пластин размером 150×150 мм толщиной 9 и 19 мм. Облицовку из смеси на фенолформальдегидном связующем варьировали по толщине в пределах 2—10 мм через каждые 2 мм. Толщина стенки кокиля составляла 80 мм. В опытах выдерживали постоянный состав шихты и режимы плавки и заливки: 10 кг металла быстро расплавляли в индукционной печи, перегревали до 1670°K и заливали при 1620 K . Состав чугуна был близок к эвтектическому: 3,7—3,8% C, 1,77—1,8% Si, 0,66—0,72% Mn, 0,095—0,1% P, 0,024—0,029% S. Отливки удаляли из формы после эвтектоидного превращения.

Результаты исследований представлены на рис. 152 и 153. Длина пластинок графита возрастает с удалением от поверхности отливки, затем переходит в область постоянных значений. Последнее обстоятельство проявилось наиболее четко при $2X_1 = 19$ мм (рис. 152, а). Опыты с металлом одной плавки и, следовательно, при одинаковых условиях зародышеобразования показали, что переход длины пластинок графита в область постоянных значений сдвигается вглубь от поверхности отливки по мере увеличения толщины облицовки $X_{ог}$ (рис. 152, б). Твердость отливок повышается с уменьшением $X_{ог}$ и $2X_1$ (рис. 153). Характер распределения твердости по сечению отливки аналогичен изме-

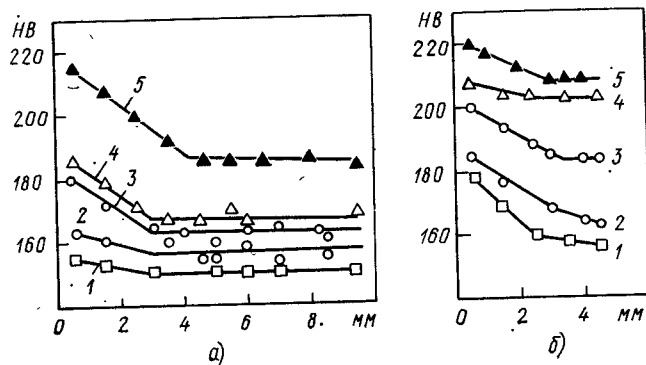


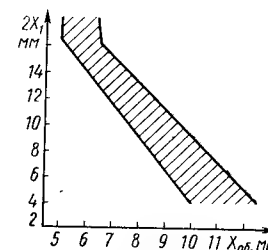
Рис. 153. Изменение твердости по толщине $2X_1 = 19$ мм (а) и $2X_1 = 9$ мм (б) стенки плоских отливок из серого чугуна при различной толщине облицовки. Обозначения кривых те же, что и на рис. 152

нению длины графитовых включений: в поверхностных слоях твердость падает, а в остальной части сечения имеет постоянное значение.

Приведенные экспериментальные данные вполне объясняются особенностями затвердевания и охлаждения отливок. Начальные участки кривых на рис. 152 соответствуют тому этапу формирования структуры, когда условия затвердевания отливки определяются неметаллическим слоем формы. После того, как в облицовке устанавливается почти линейное температурное поле, ее роль сводится к постоянному термическому сопротивлению между отливкой и кокилем. Это обстоятельство в сочетании с массивным кокилем ($X_2/X_1 \gg 1$) обеспечивает постоянство скорости затвердевания, чем и можно объяснить горизонтальные участки кривых на рис. 152. Вывод о постоянстве скорости затвердевания при указанных выше условиях непосредственно следует из анализа формул (23). Ясно, что в данном случае речь идет о постоянстве во времени; с увеличением $X_{об}$ скорость снижается. Из рис. 152, б видно, что переход к режиму затвердевания с постоянной скоростью осуществляется тем позже (или, что то же самое, тем дальше от поверхности отливки), чем больше $X_{об}$.

Анализ показывает, что, если затвердевание отливки в кокиле протекало с постоянной скоростью, то и эвтектоидное превращение имеет практически постоянную скорость. С этим связана одинаковая перлитная основа по всей толщине стенки отливки в описанных выше опытах. Этим же объясняются горизонтальные участки кривых на рис. 153. Повышение твердости в поверхностных слоях пластин связано с наличием в них более мелких включений графита: твердость чугуна является интегральной характеристикой, зависящей как от твердости металлической основы, так и от графитовых включений.

Рис. 154. Зависимость толщины стенки отливки из серого чугуна (3,45% С, 1,75—1,8% Si, 0,8—0,9% Mn, 0,3% Р и 0,1% S) от толщины песчано-смоляной облицовки при условии получения твердости HB 220—230



На рис. 154 показана зависимость толщины стенки чугунной отливки от $X_{об}$ при условии получения твердости HB в пределах 220—230 [167]. Опыты проводили при $X_2 = 7,0$ мм; чугун имел состав, %: 3,45 С; 1,75—1,8 Si; 0,8—0,9 Mn; 0,3 Р; 0,1 S. Металл заливали при 1618—1633 К. Замечено, что повышение начальной температуры формы на 100 град, снижает твердость HB на 10 ед. Эти данные дополняют рассмотренные выше: влияние $X_{об}$ на твердость и, следовательно, микроструктуру чугуна проявляется и при использовании тонкостенного кокиля.

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно широких возможностях управления структурообразованием при литье чугуна в облицованный кокиль, а также о том, что эти возможности согласуются с особенностями процесса теплообмена в системе отливка — облицованный кокиль. Примером рационального использования возможностей облицованных кокилей могут служить разработанные в НИИСиЛе промышленные процессы получения высококачественных чугунных отливок. Некоторые из этих процессов рассматриваются ниже. Их термические параметры рассчитывали по формулам гл. II, при этом учитывали положения глав III—VI и параграфа 1 настоящей главы.

Распределительный вал двигателя автомобиля «Москвич-412» изготовляют из низколегированного серого чугуна; масса отливки 3,7 кг. К этой детали предъявляются особые требования; отбел на носиках кулачков и эксцентрика — глубиной не менее 1,5—3,0 мм при твердости HRC не менее 49, твердость HB сердцевины в радиусе 6 мм — не более 269, точность размеров — не ниже II класса по ГОСТ 1855—55.

Технология получения распределительного вала в облицованном кокиле — яркая иллюстрация больших возможностей такой формы для получения отливок с дифференцированной структурой. В рассматриваемом случае поверхность кокиля, которая оформляет отбеленные участки отливки, не облицовывается; в остальной части рабочее гнездо формы имеет покрытие толщиной 3—5 мм (в зависимости от сечения соответствующего элемента отливки) и толщиной 8 мм на питающих отливку бобышках.

Анализ микроструктуры отбеленных участков кулачка показал, что первичный цементит имеет столбчатую ориентацию, что обеспечивает, как известно, наиболее высокую износостойкость детали. По мере удаления от рабочей поверхности отливки ориен-

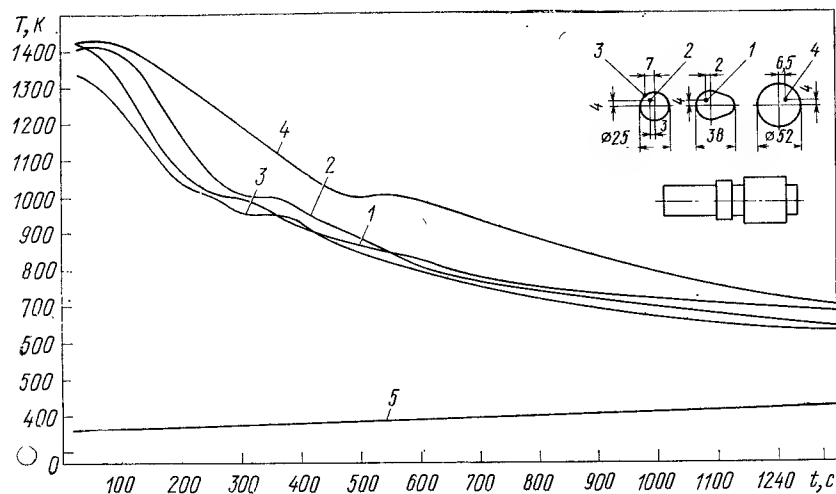


Рис. 155. Температурные кривые распределительного вала двигателя автомобиля «Москвич-412»; литье в облицованные кокили:

1—4 — термопары, установленные в отливке; 5 — термопара на поверхности кокиля

тация цементита нарушается и увеличивается количество перлита. В «затылочной» части структура кулачка содержит до 3% цементита.

На рис. 155 представлены кривые изменения температуры элементов отливки распределительного вала двигателя автомобиля «Москвич-412». Характер взаимного расположения температурных кривых показывает, что выбор различной толщины облицовки (3 мм — на утолщенной части $\varnothing 52$ мм и 5 мм на цилиндрической части $\varnothing 25$ мм) не обеспечивает в данном случае направленное затвердевание (питающие бобышки расположены по торцам, а утолщение $\varnothing 52$ мм — посередине отливки). Объясняется это сильным захлаживающим действием необлицованной части кокиля. В соответствии с указанным характером температуры отливки изменяется твердость по оси детали: локальное увеличение твердости закономерно связано с местоположением кулачков и эксцентрика.

Рассмотренный пример чрезвычайно показателен: особые требования к микроструктуре оказались в противоречии с оптимальными условиями питания отливки, т. е. с требованиями к макроструктуре. Какому из этих требований следует отдать предпочтение, — зависит от конкретных условий: назначения детали, склонности к усадке, особенности кристаллизации и др.

Коленчатый вал дизельного двигателя СМД-14 отливают из высокопрочного чугуна; масса отливки 62 кг. Применяемый при этом облицованный кокиль представляет собой двухместную форму массой 1900 кг. Ее металлоемкость равна 180 кг.

К отливкам коленчатых валов предъявляются очень жесткие требования по макро- и микроструктуре. В частности, никакие дефекты усадочного происхождения не допускаются. Поэтому важным моментом рассматриваемой технологии является направленность затвердевания. Решение этой задачи сопряжено с большими трудностями: вал имеет неблагоприятное сочетание конструктивных элементов. Достаточно отметить, что приведенные толщины опорной шейки, шатунной шейки и щеки вала равны 24; 21,5 и 12,5 мм соответственно (без учета центральных отверстий в шейках). Направленность затвердевания была обеспечена выбором места установки прибылей и различной толщиной облицовки: на шейках — 3—4, на щеках — 5—6 и на прибылях 8—12 мм. Здесь уместно отметить, что задача обеспечения плотной отливки при литье в одноместную оболочковую форму (старая технология) решалась увеличением массы прибыли. Таким образом, процесс литья в облицованный кокиль позволил сократить расход металла на литниково-питающую систему примерно в 2 раза.

На рис. 156 приведены результаты экспериментальных исследований тепловых режимов литья коленчатых валов двигателя СМД-14. Там же показаны места установки термопар. Термопара 9 находилась в оболочковой форме на расстоянии 5 мм от поверхности отливки, а термопары 8 и 9 располагались в кокиле на обеих его поверхностях. Как видно на рис. 156, по мере удаления от прибыли к хвостовику и к середине вала температурные кривые располагаются все ниже, что свидетельствует о направленности теплоотвода (кривые 3—2—1 и 3—4—5—6—7). Перепад температур по длине вала, который охлаждается в кокиле, заметно больше, чем в оболочковой форме. Все эти факты подтверждают более благоприятные условия питания отливки в кокиле. Кривые наглядно показывают возможность облицованного кокиля в части сокращения продолжительности формирования отливки. Так, в оболочковой форме температура 1170 К наступает на 1920 с, а в облицованном кокиле — на 600 с. Анализ температурных кривых показывает также, что в облицованном кокиле процессы первичной кристаллизации и перекристаллизации происходят с заметно большими скоростями.

Высокие механические свойства рассматриваемых отливок ($\sigma_b \geq 700$ МПа (70 кгс/мм²), $\delta \geq 3\%$, $a_n \geq 0,2$ МДж/м² (2 кгс $\times$ м/см²)) обеспечиваются термической обработкой — двойной нормализацией или изотермической закалкой. Поэтому в рассматриваемой технологии важнейшей является задача обеспечения заданной макроструктуры. Требования к микроструктуре в литом состоянии отступают на второй план, исключение относится к форме графита и количеству структурно-свободного цементита. При указанных выше толщинах облицовки в чугуне (3,2—3,6% С; 2,4—3,2% Si; 0,6—0,8% Mn; до 0,007% S; до 0,1% P; до 0,1% Cr;

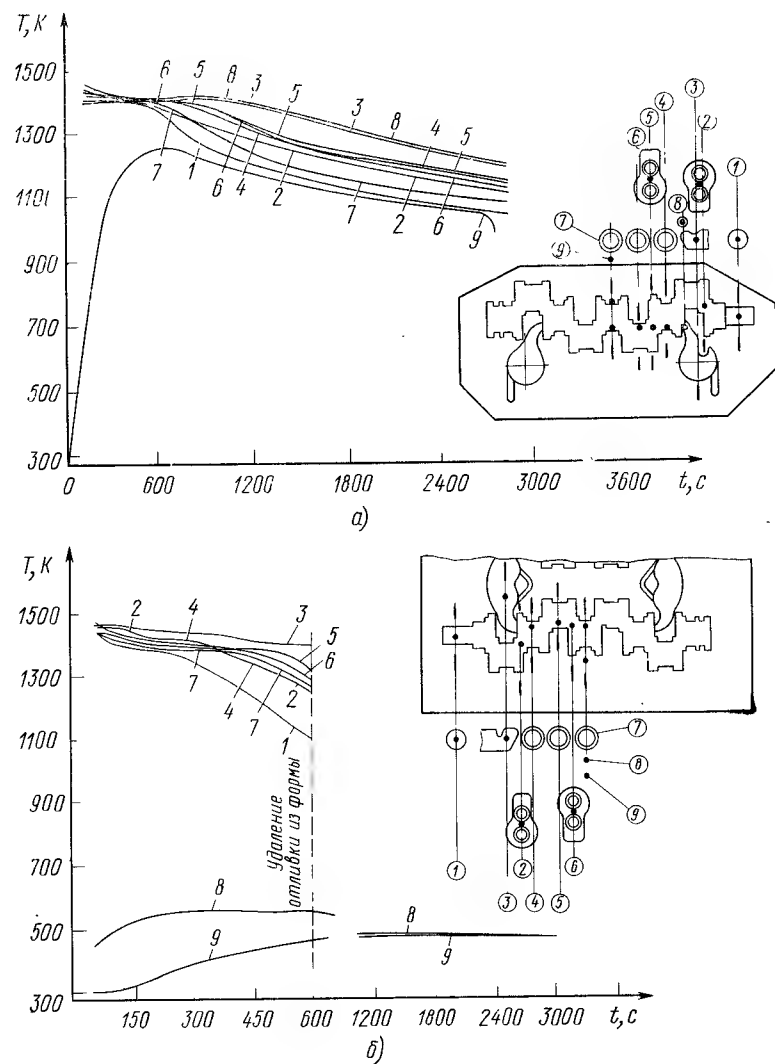


Рис. 156. Температурные кривые при охлаждении коленчатого вала двигателя СМД-14 в оболочковой форме (а) и в облицованном кокиле (б)

0,045—0,090% Mg), модифицированном магнием в автоклаве, структура отливки во всех сечениях содержит шаровидные включения графита, соответствующие 1—2 баллам по ГОСТ 3443—77.

В последние годы в промышленных масштабах освоено производство в облицованных кокилях следующих чугунных отливок:

корпус редуктора массой 64 кг, крышка корпуса редуктора массой 36 кг, гильза цилиндра тепловозного двигателя массой 160 кг, станина электродвигателя массой 18,5 кг и др.

3. ЛИТЬЕ СТАЛИ

Первые в нашей стране успешные работы по получению стальных фасонных отливок в облицованных кокилях были проведены в НИИСтЛе. Основывались они на использовании облицовок из сыпучих песчано-смоляных смесей. Практическое применение нашли также керамические облицовки и покрытия из жидких самотвердеющих составов.

При изготовлении отливок из сплавов с повышенной усадкой, в частности из стали, облицованный кокиль облегчает решение таких практически важных задач, как уменьшение технологических напусков и прибылей и снижение термических напряжений. Все они являются, по существу, частными случаями более общей задачи — получения отливки с заданной макроструктурой. Ее решение при литье стали облегчается тем обстоятельством, что к стальным отливкам не предъявляются обычно специальные требования по микроструктуре. Последняя обеспечивается термической обработкой. Ниже приводятся примеры решения указанных задач.

Буксу железнодорожного вагона изготавливают из стали 25Л; масса детали — 46,4 кг. Опробованная технология литья в облицованный кокиль заключается в следующем. Форма двухместная, габаритные размеры 1300 × 700 × 250/250 мм, разъем (по заливке) вертикальный (рис. 157). Кокиль толстостенный, $X_2 = 70$ мм. Внутренняя поверхность отливки оформляется песча-

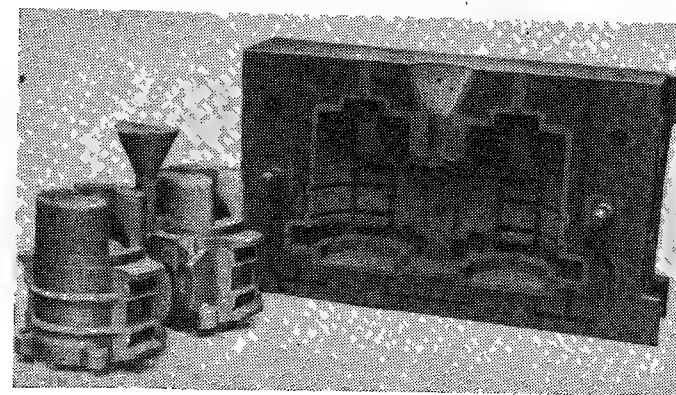


Рис. 157. Стальная букса железнодорожного вагона и облицованный кокиль

ным стержнем. Направленность затвердевания металла в облицованном кокиле обеспечивается переменной толщиной облицовки, изменяющейся от 8—10 мм у прибыли до 4—6 мм в нижней по заливке части, и верхним расположением питателя. Задача питания отливки при литье в песчаную форму (старая технология) решается в основном за счет технологического напуска по внутреннему отверстию детали. При этом масса отливки составляет 74 кг против 60 кг при литье в облицованные кокили. Основные моменты новой технологии поясняются рис. 157.

Ведущее колесо трактора изготавливают из стали 40Л. Масса детали 104 кг. Опытные работы по литью колеса в облицованном кокиле показали следующее. Масса отливки 116,7 кг (при литье в песчаную форму 123 кг). Металл к отливке необходимо подводить через три питателя и заливать при 1540—1560° С в течение 25—35 с.

Рассматриваемая отливка в центральной части имеет стенку толщиной 33 мм, а в периферийной — стенку толщиной 15 мм. Конструкция колеса и характер его механической обработки однозначно определяют место расположения прибыли — над утолщенной частью. В этом случае при одинаковых условиях теплоотвода от всех элементов отливки возникают значительные температурные напряжения, приводящие к радиальным трещинам в утолщенном элементе колеса. Путем локального утолщения облицовки в отношении 3 : 1 против стенки $2X_1 = 15$ мм и расщедоточения питания термические трещины удалось избежать. При этом процесс затвердевания сохранял направленный характер, что подтверждается экспериментальными температурными кривыми.

Отливки из высоколегированной стали. Большой интерес представляет опыт получения в облицованных кокилях отливок сложной конфигурации из высоколегированных сталей. При отработке технологии применяли облицовки из керамического состава на этилсиликатном связующем и из песчано-смоляной смеси. Предпочтение было отдано последней при использовании в качестве минерального наполнителя смеси цирконового концентрата. Отливки в данном случае имеют поверхность, мало уступающую той, которая получается при литье в объемные керамические формы (Шоу-процесс).

Приведенные выше примеры литья стали в облицованные кокили представляют собой часть разработок НИИСЛ. Однако и они наглядно иллюстрируют эффективность использования кокилей, облицованных песчано-смоляными смесями, для получения сложных фасонных отливок из углеродистых и высоколегированных сталей.

В связи с использованием в покрытии фенолформальдегидного связующего необходимо отметить, что при литье в облицованные

кокили стальные детали не имеют тех специфических дефектов поверхности, которые возникают при литье в оболочковые формы. Как известно, дефекты в виде поверхностных раковин связаны с присутствием в оболочковой форме смоляного связующего. Отсутствие специфических дефектов поверхности стальных отливок находит свое объяснение в свете особенности механизма затвердевания отливки при поверхностном науглероживании [130].

Другие примеры. Как указывалось, при производстве стальных отливок промышленное применение нашли кокили с керамической облицовкой и облицовкой из ЖСС. Изучалась возможность получения корпусных стальных отливок массой до 10 000 кг в тонкостенных кокилях ($X_2 = 5$ мм) с керамической облицовкой ($X_{06} = 10 \div 25$ мм) (М. И. Рошин, Е. А. Чернышев и др.). Технология получения такой формы заключается в следующем. Керамическую суспензию изготавливают из гидролизованного этилсиликата 40 и сухого наполнителя, который состоит из маршалита и кварцевого песка в отношении 3 : 1. В качестве гелеобразователя используют 15%-ный раствор NaOH. Керамическую массу заливают в зазор между моделью и кокилем. После ее схватывания модель удаляют. Затем форму поджигают для удаления летучих и прокаливают газовыми горелками. Сталь заливают при 1850 К. После заливки кокиль, кроме прибыльной части, охлаждают водовоздушной смесью.

Авторы исследования на основе опыта получения отливки со стенками толщиной 150—170 мм отмечают, что использование тонкостенных облицованных кокилей с интенсивным охлаждением позволяет получать более плотные отливки по сравнению с объемными формами. Механические свойства повышаются в среднем на 15%. При этом повышается также однородность свойств по высоте и сечению отливки.

Тонкостенные водоохлаждаемые кокили опробовали также с облицовкой из ЖСС [10]. В результате этих работ рекомендуются кокили, изготовленные с помощью электросварки из листовой стали толщиной 1,5—2,5 мм. Конфигурация кокилей приближенно соответствует отливке. Управление процессом охлаждения стальной отливки в тонкостенном кокиле осуществляется так же, как и в толстостенном, — дифференцированным выбором толщины облицовки. Подчеркивается, что эта технология применима в основном при мелкосерийном производстве.

Толстостенные кокили с облицовкой из ЖСС применены для получения крупных стальных отливок — бандажей катков размалывающих бегунов массой 7000 кг из стали 35ГЛ и 110Г13Л [81]. Структура отливок, полученных в таких формах, состоит из равноосных кристаллов. Эксплуатационная проверка бандажей показала их высокую эксплуатационную надежность.

Облицованный кокиль опробован для получения еще более сложной отливки из высокомарганцовистой стали — сердечника стрелочного перевода (Н. А. Воронова, Л. А. Логвинов). Толщина облицовки составляет 20—30 мм и утоняется в тех местах, где необходима увеличенная скорость охлаждения отливки. Покрытие наносится методом выжимания моделью состава, налитого в кокиль. Форму окрашивают и подсушивают при 470—520 К в течение 2 ч.

Сравнительное исследование металла в рабочей зоне сердечников показало: в случае литья в кокиль плотность его повышается в среднем на 9 кг/м³ (с 7785 до 7794 кг/м³), что объясняется увеличенной скоростью теплоотвода. Такое увеличение плотности повышает износостойкость стали 110Г13Л на 27%.

В заключение необходимо отметить, что с применением облицовки разрешается проблема использования кокилей для получения сложных фасонных отливок из стали: отпадают трудности, связанные с неподатливостью формы; повышается стойкость формы.

4. ЛИТЬЕ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

Литье цветных сплавов в облицованные кокили пока не получило широкого развития. Однако имеющийся практический опыт свидетельствует о больших перспективах данного способа получения высококачественных отливок.

В работе [116] исследовалась возможность применения облицованного кокиля для литья бронзы Бр. ОЦ 10-2. Облицовку на кокиль наносили из жидкой самотвердеющей смеси. Гидроплотность исследовали на литых пробах — втулках с наружным диаметром 145 и внутренним 133 мм при высоте 100 мм. Внутренняя поверхность втулки оформлялась песчаным стержнем.

Установлено, что гидроплотность наиболее сильно зависит от толщины облицовки. Поэтому для исследований влияния $X_{об}$ на механические свойства σ_b , σ_T , δ и плотность ρ_1 материала отливки толщина кокиля была принята постоянной и равной удвоенной толщине стенки отливки. Резкое снижение механических свойств и плотности при $X_{об} = 3$ мм авторы объясняют переходом от столбчатой к равноосной структуре, а некоторое повышение этих показателей при $X_{об} = 12$ мм — распределением пор по всему сечению стенки отливки.

Результаты приведенных исследований были использованы при разработке технологии получения из Бр. ОЦ 10-2 отливок арматуры высокого давления: патрубка массой 180 кг и колена массой 300 кг. Толщину облицовки устанавливали так, чтобы обеспечить направленное затвердевание отливки; минимальная толщина составляла 5 мм и постепенно увеличивалась до 12 мм к основанию прибыли. Металл в форму заливали при 1470—1490 К.

С помощью облицованных кокилей ликвидирован брак по гидроплотности отливок из алюминиевой бронзы Бр. АМц 9-2 (при литье в песчаные формы брак составлял 20%) [37]. На кокили наносится керамическое покрытие толщиной 10 мм; толщина облицовки кокилей и литниковой системы равна двум приведенным толщинам оформляемого элемента. Толщина стенки кокиля составляет 20 мм. Результаты промышленного опробования данной технологии показали, что трудоемкость формовки сокращается на 50—60% и расход металла снижается на 20%; уменьшаются припуски на механическую обработку с 10 до 1—1,5 мм, что позволило снизить массу комплекта отливок с 20 до 12 кг.

Раздел четвертый

МЕХАНИЗАЦИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Глава XIX

КОКИЛЬНЫЕ ОДНО- И МНОГОПОЗИЦИОННЫЕ МАШИНЫ

1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗАЦИИ

Особенности технологии литья в кокиль, рассмотренные в предыдущих разделах книги, определяют основные требования, которым должно удовлетворять соответствующее технологическое оборудование: надежное запираение формы в период заливки и формирования отливок; обеспечение требуемых усилий для разборки кокиля, извлечения металлических стержней и удаления отливок; поддержание заданной технологическим процессом продолжительности нахождения отливок в форме, времени извлечения металлических стержней, либо отхода одной из частей формы; поддержание заданного теплового режима кокиля.

Механизация кокильного литья прошла последовательно следующие этапы развития: ручные кокили, механизированные кокили с ручным управлением и приводом движения частей с помощью пневмоцилиндров, электродвигателей, гидроцилиндров; полуавтоматические кокильные машины; автоматизированные и комплексно-механизированные линии, комплекты оборудования с полной механизацией основных и вспомогательных операций технологического процесса.

Кокильные машины подразделяются на две группы: стационарные и нестационарные. Первая группа включает одно-, двух- и трехпозиционные, а вторая четырех- и более позиционные машины. Машины обеих групп представляют собой универсальные и специальные конструкции, причем с увеличением числа позиций машины в каждой группе наблюдается уклон в сторону специализации.

В зависимости от расположения плоскости разъема в пространстве и от характера перемещения формообразующих элементов кокиля (собственно кокиля и металлических стержней) различают машины для получения отливок в формах с горизонтальной и вертикальной плоскостями разъема. В последнем случае число подкокильных плит может быть от 1 до 5 (включая подвижные поддоны и верхние стержни).

На практике применяют также конструкции с переменным положением плоскости разъема. Широкие технологические возможности имеет конструкция, при которой изменение положения кокиля осуществляется в пределах одного технологического цикла в зависимости от характера выполняемой операции.

В группу стационарных машин входят конструкции, построенные на весьма разнообразных компоновочных решениях. Однако наибольшее число машин имеют рамное исполнение (с цилиндрическими направляющими для перемещения кокильных плит) или консольное. Первые применяют в основном при производстве относительно крупных отливок из черных и цветных сплавов, а вторые — при производстве мелких отливок из легких цветных сплавов.

Для крупносерийного и массового производства отливок наиболее целесообразным является применение нестационарных машин. По сравнению со стационарными они имеют следующие преимущества: во-первых, высокую производительность благодаря совмещению во времени всех операций технологического цикла получения отливки; во-вторых, минимальную занимаемую площадь, наименьшие энергетические затраты, удобство обслуживания и наиболее рациональную организацию работы; в-третьих, возможность механизации и автоматизации основных и вспомогательных операций и на этой основе возможность встраивания в автоматические линии производства отливок.

В практике кокильного литья нашли применение нестационарные (многопозиционные) установки двух типов: карусельные и конвейерные. Первые получили наибольшее распространение благодаря минимальной занимаемой площади и удобству подвода энергоносителей (масла и сжатого воздуха для приводных цилиндров, воды для охлаждения кокилей, электроэнергии и т. п.).

Большинство созданных карусельных кокильных машин имеет четное число позиций — 4, 6, 8, 12, 16. Известна, однако, пятипозиционная карусельная машина фирмы «Voisin» (Франция), предназначенная для отливки алюминиевых головок автомобильных двигателей. Поворот каруселей осуществляется, как правило, вокруг вертикальной оси, т. е. платформа с кокильными секциями перемещается в горизонтальной плоскости. Исключение составляет четырехпозиционная машина мод. ЛМВ450 с горизонтальной осью вращения.

За последнее десятилетие широкое распространение получил гидравлический привод кокильных машин, обеспечивающий значительные усилия запираения, раскрытия кокилей, извлечения металлических стержней и выталкивания отливок. С помощью гидравлического привода достигаются плавность перемещения частей кокиля, бесшумность его работы, а также компактность машины, так как высокое давление в гидроприводе позволяет до-

сшить малыми цилиндрами больших усилий без применения специальных усиливающих устройств [98, 58].

В большинстве созданных прогрессивных моделей кокильных машин, как правило, предусмотрен полуавтоматический цикл работы с автоматизацией следующих операций: сборка кокиля, поддержание отливки в период кристаллизации, извлечение металлических стержней, раскрытие кокиля и выталкивание отливки, съем отливки и вынос ее из рабочей зоны машины.

Научные исследования для создания кокильных машин являются развитием традиций отечественной школы проектирования литейного оборудования, становление которой связано с именем П. Н. Аксенова [1].

2. УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ МАШИНЫ

В СССР широкое распространение получила гамма универсальных кокильных машин, разработанная в НИИСЛ. Серийное их производство освоено на ряде заводов страны. В основу гаммы положен размерный ряд подкокильных плит, обеспечивающих возможность установки кокилей с размерами от 250×200 до 1000×800 мм.

Гамма включает машины следующих типов: а) с вертикальным разъемом кокиля, с одной подвижной плитой; б) с вертикальным разъемом кокиля, с двумя подвижными плитами и поддоном; в) с вертикальным разъемом кокиля, с двумя подвижными плитами, поддоном и механизмом верхних стержней; г) с горизонтальным разъемом кокиля, с верхней подъемно-поворотной плитой. Модели машин, входящих в гамму, предназначены для литья цветных и черных сплавов.

Наиболее полное представление о конструктивных особенностях гаммы дает рассмотрение базовых моделей 5915, 5922, 5944 и 5966. Техническая характеристика указанных машин и их аналогов указывается ниже в сводных таблицах. Развитием созданной в НИИСЛ гаммы кокильных машин является новая гамма агрегатированных машин, разработанная в специальном конструкторском бюро точного литья (СКБТЛ), г. Тирасполь.

Машина мод. 5915 (рис. 158) имеет две подкокильные плиты 1, 2, одна из которых неподвижна и крепится к станине 5, а вторая перемещается по диагонально расположенным направляющим 6, связывающим неподвижную подкокильную плиту и стойку с гидроцилиндром.

Выталкивание отливки и возврат толкателей в исходное положение в подвижной половине кокиля происходит в крайних положениях плиты с помощью регулируемых по длине тяг, которые пропущены в отверстия неподвижной стойки и соединены с плитой толкателей. Из неподвижной половины кокиля отливка

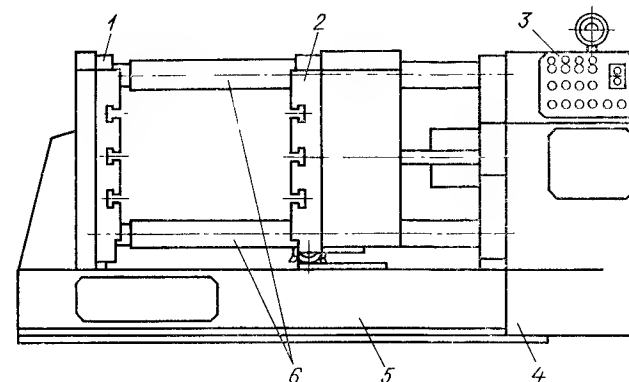


Рис. 158. Машина мод. 5915:

1, 2 — подкокильные плиты; 3 — пульт управления; 4 — шкаф гидрпанелей; 5 — станина; 6 — направляющие

выталкивается с помощью рычажного механизма, приводимого в движение гидроцилиндром, расположенным в станине.

Устанавливаемый на машину кокиль может быть дополнительно снабжен гидроцилиндром для привода металлического стержня. Опыт эксплуатации машины показал ее надежность и удобство в обслуживании.

Основные данные машин (тип а) с вертикальным разъемом кокиля, с одной подвижной плитой

Параметры	5912	5913	5914	5915
Размеры рабочего места на плитах для крепления кокиля (ширина×высота), мм	400×320	500×400	630×500	800×630
Наименьшее расстояние между плитами, мм	400	500	500	630
Ход плиты, мм	320	400	400	500
Усилие раскрытия кокиля, кН	35	50	80	125
Габаритные размеры, мм:				
длина	2230	2400	2250	2600
ширина	850	950	1200	1400
высота	1500	1500	1200	1200

Машина мод. 5922 (рис. 159) имеет механизмы подвижных плит, выполненные в виде агрегатных узлов: подкокильная плита 3 закреплена консольно на двух цилиндрических направляющих, которые перемещаются в опорах неподвижной стойки с помощью

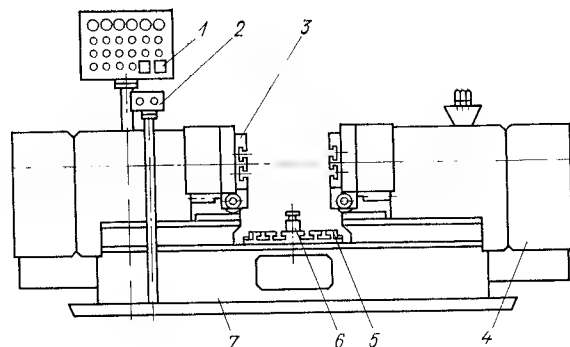


Рис. 159. Машина мод. 5922:

1 — наладочный пульт; 2 — рабочий пульт; 3 — подкокильные плиты; 4 — шкаф гидродпанелей; 5 — поддон; 6 — механизм нижнего стержня; 7 — рама

гидравлического цилиндра. Агрегатный узел включает систему выталкивания и фиксации отливки на поддоне 5, а также возврата толкателей в исходное положение при полном раскрытии кокиля. Механизм поддона обеспечивает выталкивание отливки и выем металлического стержня.

Конструкция машины позволяет устанавливать кокиль с двумя дополнительными боковыми стержнями и применять дозатор для заливки металла в кокиль. Отсутствие сплошных направляющих создает хорошие условия для обслуживания кокиля.

Основные данные машин (тип б) с вертикальным разъемом кокиля, с двумя подвижными плитами и поддоном

Параметры	5922	5923	5924	5926А
Размеры рабочего места на плитах для крепления кокиля, мм:				
основных (ширина×высота)	400×320	500×400	630×500	1250×630
поддона	500×400	500×400	630×500	1250×800
Наименьшее расстояние между плитами, мм	400	500	500	630
Ход, мм:				
основных плит (каждой)	200	200	250	320
плиты толкателей	50	50	100	100
Усилие раскрытия кокиля, кН	35	50	100	200
Габаритные размеры, мм:				
длина	2800	2800	3200	3560
ширина	850	950	1850	1540
высота	1500	1500	2400	2675

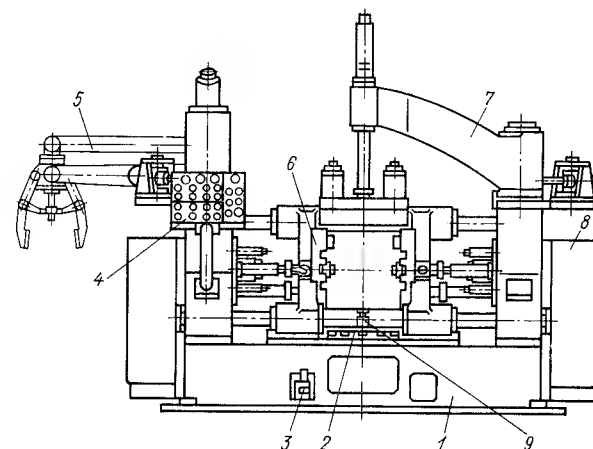


Рис. 160. Машина мод. 5944:

1 — станина; 2 — поддон; 3 — педаль управления; 4 — пульт; 5 — съемник отливок; 6 — подкокильные плиты; 7 — механизм верхнего стержня; 8 — шкаф гидродпанелей; 9 — механизм нижнего стержня

Машина мод. 5944 (рис. 160) предназначена для изготовления отливок сложной конфигурации в кокилях, состоящих из четырех и более подвижных частей.

Подкокильные плиты 6 перемещаются по двум диагонально расположенным цилиндрическим направляющим, закрепленным в неподвижных стойках. Система выталкивателей позволяет фиксировать отливку при раскрытии полуформ на поддоне и автоматически убирать ее съемником 5 отливок, которым оснащаются машины этого типа.

Механизм верхнего металлического стержня 7 смонтирован на поворотной траверсе. Механизм монтируется на стальной колонке, вокруг которой он поворачивается на 90°. На траверсе крепятся цилиндр перемещения верхнего стержня и два цилиндра для подрыва стержней после заливки. Конструкцией исключается передача нагрузок на колонну при извлечении металлического стержня.

На левой стойке механизма боковых плит установлен съемник 5 отливок, выполненный по типу пантографа. Подъем и поворот съемника осуществляется гидроцилиндрами, захват отливки — пневмоцилиндром. Съемник захватывает отливку, отводит ее в противоположную от оператора сторону и опускает отливку на транспортер либо приемный стол.

Машина мод. 5966 предназначена для изготовления крупногабаритных отливок в кокилях с горизонтальной плоскостью разъема (рис. 161).

Основные данные машин (тип в) с вертикальным разъемом кокиля, с двумя подвижными плитами, поддоном и механизмом верхних стержней

Параметры	5944	5946 А	5946 Б
Размеры рабочего места на плитах для крепления кокиля, мм:			
основных (ширина×высота) . .	630×500	1250×630	1250×630
верхнего стержня	500×400	800×500	800×500
поддона	630×500	1250×800	1250×1000
Наименьшее расстояние между плитами, мм	500	630	1000
Ход плит, мм:			
основных (каждой)	250	320	320
верхнего стержня	400	500	500
плиты толкателей	100	100	100
Усилия раскрытия кокиля (не менее), кН	100	200	200
Мощность электродвигателя гидроагрегата, кВт	13	13	13
Габаритные размеры с механизмом съема, мм:			
длина	3200	3560	3930
высота	1850	2350	2350
ширина	2525	2835	2835

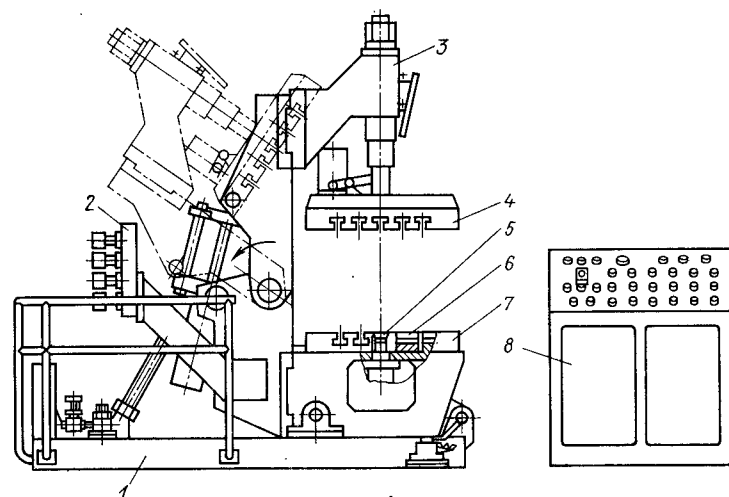


Рис. 161. Машина мод. 5966:

1 — станция; 2 — гидропанели; 3 — механизм верхней плиты; 4 — верхняя плита;
5 — механизм нижнего стержня; 6 — механизм толкателей; 7 — поддон (нижняя плита);
8 — пульт управления

Верхняя плита 4 совершает прямолинейное движение на 200 мм с последующим поворотом на 55°. Поворот плиты предназначен для облегчения осмотра и обслуживания кокиля, создает удобство установки кокилей на машину и песчаных стержней в форму.

Механизм верхней плиты имеет рычажное устройство для подрыва верхней полуформы и цилиндр вертикального перемещения плиты. Устройство (А. с. № 349477) исключает передачу усилия подрыва на станину машины.

Гидроцилиндр вертикального перемещения плиты укреплен на корпусе и связан с плитой штоком через траверсу и направляющие колонки. Механизм нижнего стержня 5 жестко смонтирован на станине 1. На поддоне 7 имеется плита 6 нижних толкателей, которая приводится в движение двумя гидроцилиндрами, укрепленными на нижней стороне поддона. Тут же расположен гидроцилиндр нижнего стержня.

На машине возможно подключение дополнительных боковых стержней с гидроцилиндрами, входящими в комплект кокильной оснастки. С тыльной стороны машины закреплены гидропанели 2 с электрогидрозолотниками. Электро- и гидросхемы машины позволяют работать без любого из стержней, с дозатором или без него, а также рассчитаны на подключение механизма съема отливков.

Машина установлена на раме на двух цапфах и имеет возможность поворачиваться с помощью винтов на угол от 0 до 20° от вертикали.

Основные данные машины: размеры рабочего места на плитах для крепления кокиля 1000×800 мм; наименьшее расстояние между плитами 500 мм; прямой ход плиты 200 мм; угол поворота плиты 55°; усилие раскрытия кокиля 18 кН; габаритные размеры 2450×2000×2400 мм.

Наряду с существенными преимуществами машин, входящих в гамму, опыт их серийного изготовления и многолетней эксплуатации показал и ряд недостатков: большая установленная мощность гидроприводов, значительные габаритные размеры машин, отсутствие механизации съема отливок на машине с горизонтальным разъемом, неудачная конструкция механизма поддона, неудобство заливки кокилей на крупных машинах из-за большой высоты.

Агрегатированные машины. В гамму агрегатированных конструкций входят пять типов однопозиционных машин: с одной подвижной и одной неподвижной плитой; с двумя подвижными плитами; с двумя подвижными плитами и поддоном с нижним стержнем; с двумя подвижными плитами, поддоном с нижним стержнем и верхним стержнем; с двумя подвижными плитами, поддоном с нижним стержнем, верхним и торцовым стержнем.

Машины предназначены для производства отливок в основном из алюминиевых сплавов. Преимущества этой гаммы машин в сле-

дующем: система управления — на бесконтактных элементах, высокая степень унификации и более совершенные конструктивные решения некоторых узлов.

3. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СТАЦИОНАРНЫЕ МАШИНЫ

В НИИЛитавтопроме разработана трехпозиционная машина мод. 4546, предназначенная для отливки в кокилях с горизонтальной плоскостью разреза головок блока цилиндров и выпускной трубы автомобильного двигателя (рис. 162).

Машина имеет одну верхнюю 2 половину кокиля, расположенную на средней позиции, и две нижние 1, поочередно совмещающиеся с верхней. Одновременно с заливкой металла в сомкнутый кокиль и формированием отливки на позиции II, на позиции I или III, где находится вторая нижняя половина кокиля, производится удаление отливки, обслуживание кокиля и установка песчаных стержней. Таким образом достигается частичное совмещение технологических операций по времени, что приводит к повышению производительности машины.

Верхняя половина при раскрытии кокиля поворачивается вокруг горизонтальной оси на 95° ; нижние половины перемещаются на двух тележках 3 по направляющим 5 станины 7. В станине под тележками находятся три гидроцилиндра 6: средний — для поджима кокиля плитой 4, боковые — для выталкивания отливок плитой 8. Поворот верхней половины кокиля и передвижение

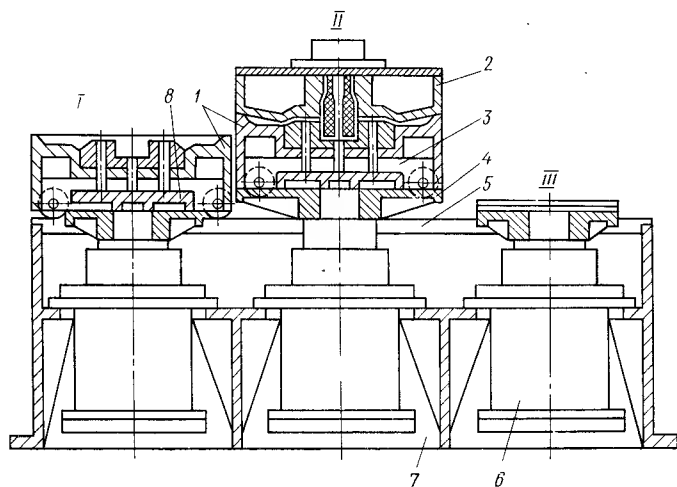


Рис. 162. Машина мод. 4546:

1 — нижняя половина кокиля; 2 — верхняя половина кокиля; 3 — тележка; 4 — плита поджима; 5 — направляющие; 6 — гидроцилиндры; 7 — станина; 8 — плита выталкивателей

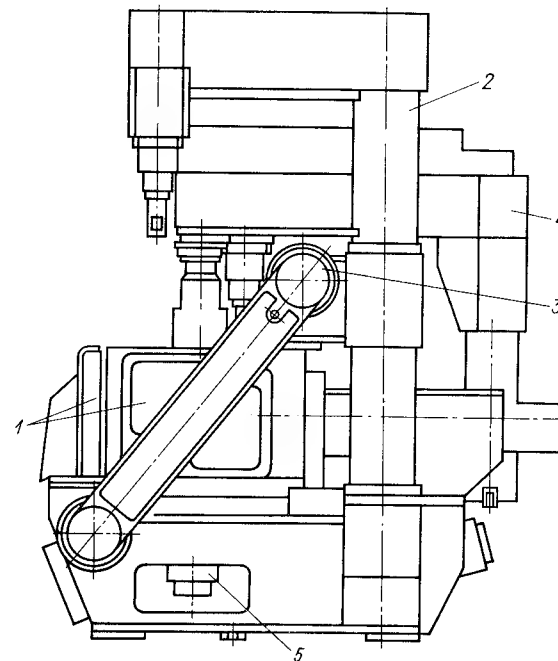


Рис. 163. Машина мод. 59C19:

1 — подкокильные плиты; 2 — съемник отливок; 3 — механизм перемещения боковых плит; 4 — механизм верхнего стержня; 5 — механизм поддона

тележек осуществляется также гидроцилиндрами. Цикл работы — полуавтоматический.

Основные данные машины: наибольшая масса отливаемых деталей из алюминиевого сплава 50 кг, производительность 15 шт/ч, максимальные размеры кокиля $900 \times 600 \times 400$ мм, ход нижней подкокильной плиты 60 мм, угол поворота верхней половины кокиля 95° , усилие выталкивания отливки 200 кН, габаритные размеры $2000 \times 1550 \times 950$ мм.

Для производства в многоразъемных кокилях пустотелых ребристых отливок типа станин электродвигателей, корпусов вакуумных насосов и др. создана машина мод. 59C19 (рис. 163). Машина имеет две взаимно перпендикулярные пары подкокильных плит 1 для четырех частей кокиля и механизм верхнего стержня 2. За исключением передней, все части кокиля подвижны. С целью сокращения габаритных размеров машины и упрощения обслуживания кокиля в механизмах боковых плит и верхнего стержня применены подвижные направляющие с встроенными внутри них силовыми цилиндрами. Механизм верхнего стержня 2 выполнен

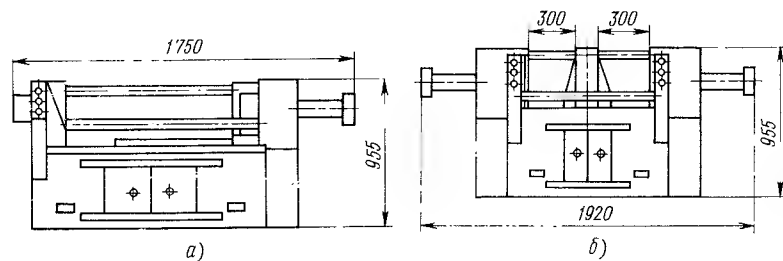


Рис. 164. Машины ЧССР типа CGU-3-HS

консольно-поворотным и для создания значительных усилий подрыва стержня из отливки он снабжен отжимными цилиндрами.

Для извлечения отливок из кокиля и передачи их на следующую технологическую операцию машина оборудована съемником 4.

Основные данные машины: размеры рабочего места на плитах для крепления частей кокиля (боковых) 500×400 мм, наименьшее расстояние между боковыми плитами 630 мм, торцовыми — 620 мм, ход боковых плит (каждой) 200 мм, подвижной торцевой плиты — 200 мм, верхнего стержня — 750 мм; усилие подрыва боковых плит 100 кН, подвижной торцевой плиты — 120 кН, верхнего стержня — 200 кН, отливки (съемников) — 20 кН; габаритные размеры $1670 \times 2325 \times 3150$ мм.

Зарубежные стационарные машины. Машиностроительный завод Vihorlat народного предприятия Spina (ЧССР) создал широкий ряд моделей унифицированных кокильных машин [58]. Машины изготавливаются четырех типов: CGH — с вертикальной плоскостью разъема и одной подвижной плитой, CGU-3-HS — с вертикальной плоскостью разъема, двумя подвижными плитами и поддоном (рис. 164); CGU-3-YO — с вертикальной плоскостью разъема, двумя подвижными плитами, поддоном и консольным поворотным механизмом верхнего стержня (рис. 165); CGU-3-YP — с комбинированным разъемом (вертикальным и горизонтальным) с двумя подвижными плитами, поддоном, верхней подвижной пли-

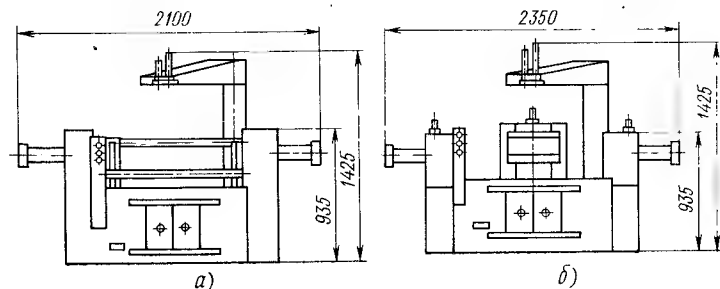


Рис. 165. Машины ЧССР типа CGU-3-YO

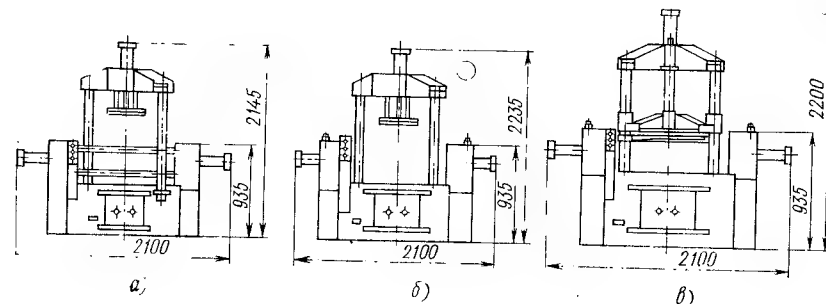


Рис. 166. Машины ЧССР типа CGU-3-YP

той (рис. 166). К последнему типу относится машина мод. CGU-3-H2P-YS (рис. 166, в).

Размеры рабочих плит машин следующие: тип CGH — 600×500 и 800×630 мм; тип CGU-3-HS — 480×400 мм; тип CGU-3-YO — 480×400 и 600×500 ; тип CGU-3-YP — 600×500 и 480×400 ; тип CGU-3-H2P-YS — 600×420 мм.

Отличительной особенностью машины типа CGH является отсутствие второй неподвижной плиты, к которой обычно крепят цилиндр, перемещающий подвижную плиту, и использование штоков цилиндров в качестве направляющих. Такое конструктивное решение значительно упрощает машину, уменьшает ее массу и полностью освобождает заднюю сторону подвижной плиты для крепления механизма выталкивания отливок.

Машины второго типа выпускаются двух моделей: CGU-3-H1S (рис. 164, а) и CGU-3-H2S (рис. 164, б). Они имеют сварную станину, в центральной части которой монтируется механизм выталкивания отливки из поддона. Слева и справа на станине установлены стойки, связанные между собой диагонально расположенными цилиндрическими направляющими. В машине мод. CGU-3-H1S (рис. 164, а) по этим направляющим перемещается одна подвижная плита. Цилиндр для ее привода закреплен на правой стойке. В левой стойке смонтирован цилиндр выталкивателя. Машина мод. CGU-3-H2S (рис. 164, б) имеет две подвижные плиты и два гидроцилиндра для их перемещения, закрепляемые на стойках. В центральной части на станине смонтирована жесткая стойка, к которой крепятся неподвижные части кокиля. В этом случае машина превращается в двухпозиционную: с двумя кокилями, имеющими по одной подвижной плите. Поэтому предусматриваются также два пульта управления, установленные на обеих стойках. Машины со сдвоенным кокилем весьма производительны. Формы заливают последовательно. Один рабочий может обслуживать две сдвоенные машины, размещенные одна против другой.

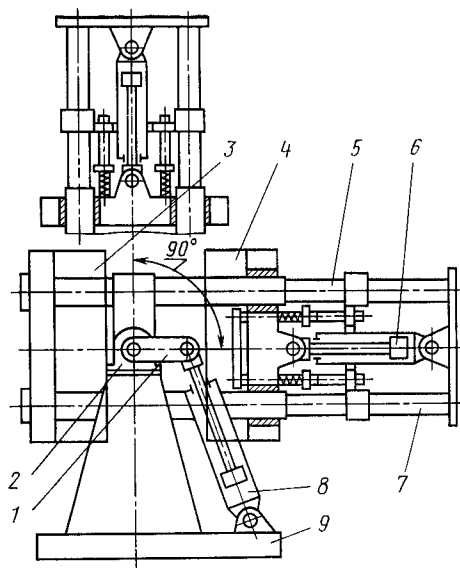


Рис. 167. Поворотная машина ПНР:
1 — рычажная передача; 2 — подшипники; 3 — подкокильная плита неподвижная; 4 — подвижная подкокильная плита; 5 и 7 — скалки; 6 и 8 — гидроцилиндры; 9 — станина

Кокильные машины третьего типа представляют мод. CGU-3-H2S-YO (рис. 165, а) и CGU-3-H3P-YO (рис. 165, б). Машина мод. CGU-3-H2S-YO создана на базе машины второго типа мод. CGU-3-H2S. Механизм верхнего стержня смонтирован на поддоне и после выема стержня из отливки поворачивается, освобождая место для механизированного удаления отливки.

Машины не имеют центральной стойки для крепления неподвижных частей кокиля.

Машина мод. CGU-3-H3P-YO, в отличие от описанной, имеет механизм с цилиндром для привода стержней (рис. 165, б), расположенных в плоскости, перпендикулярной к движению основных плит (обычно в плоскости разъема).

Машины четвертого типа мод. CGU-3-H2S-YP (рис. 166, а), CGU-3-H2P-YP (рис. 166, б) и CGU-3-H2P-YS (рис. 166, в) представляют собой наиболее сложный ряд машин. Они предназначены для производства сложных алюминиевых отливок массой до 10—15 кг. Созданы на базе модели CGU-3-YO. Механизм верхней горизонтальной плиты состоит из неподвижной плиты, смонтированной на колоннах, подвижной плиты и гидроцилиндра.

Все кокильные машины завода Vihorlat снабжены унифицированной электрогидравлической напорной станцией мод. EHTS-63. Каждая напорная станция может приводить в действие максимум шесть гидроцилиндров, работающих независимо друг от друга.

Проектным отделом «Prozamet Verpes» и институтом литья в г. Кракове (ПНР) разработан ряд машин трех основных групп [163]: для кокилей с вертикальной плоскостью разъема; горизонтальной плоскостью разъема; с переменной плоскостью разъема в пределах от 0 до 90°.

Машины с вертикальной и горизонтальной плоскостями разъема не имеют существенных конструктивных отличий от описанных выше. Интерес представляет машина с переменной плоскостью разъема. Ее устройство понятно из схемы, показанной на рис. 167.

Основные преимущества данной конструктивной схемы в следующем:

- удобная установка песчаных стержней при горизонтальном расположении плоскости разъема;

- заливка металла может происходить при наиболее благоприятном расположении плоскости разъема;

- извлечение отливки происходит при вертикальном положении плоскости разъема, благодаря чему вытолкнутая из кокиля отливка под влиянием собственной тяжести падает на склиз и далее попадает в контейнер или на конвейер.

У кокильной машины с переменной плоскостью разъема запрограммированы три цикла автоматической работы. В простейшем случае рабочий цикл сводится к такому же, как у кокильной машины с вертикальной плоскостью разъема.

Основные данные машин: размеры рабочих плит 500×400; 630×500 и 800×630 мм; ход подвижной плиты 600, 800 и 800 мм соответственно; усилие выталкивания 64, 110, 145 кН соответственно; усилие смыкания 80, 123, 204 кН.

Фирма «Fiat» (Италия) разработала ряд кокильных машин с вертикальной и комбинированной плоскостью разъема — с двумя и более подвижными плитами. Отличительной особенностью этих машин является то, что они скомпонованы из агрегатных головок, имеющих, в отличие от распространенных цилиндрических, прямоугольные направляющие. Типичным представителем этой группы машин является машина мод. 99TA/S, предназначенная для отливки деталей малолитражного автомобиля (рис. 168).

Каждая из головок является универсальной и рассчитана на усилие 53 кН и ход до 300 мм. Головка состоит из литого ползуна 4, перемещаемого по направляющим 10 гидравлическим цилиндром 3. Ползун изготовлен из чугуна с шаровидным графитом. К станине станка через промежуточную плиту закреплены направляющие 10, изготовленные из высокохромистой стали. Направляющие подвергают цементации, закалке и шлифуют.

К торцу ползуна закреплена водоохлаждаемая подкокильная плита, имеющая Т-образные пазы для крепления кокилей. Расстояние между подкокильными плитами можно регулировать с помощью промежуточных втулок 1 и гаек 2. Масло к гидроцилиндрам подается через отверстия, просверленные в основаниях головок. Выталкивание отливок осуществляется центральным выталкивателем усилием 53 кН и ходом 70 мм. Литой корпус выталкивателя гидроцилиндром 9 перемещается в цилиндрической гильзе 8, прикрепленной к станине станка. Основным преимуществом кон-

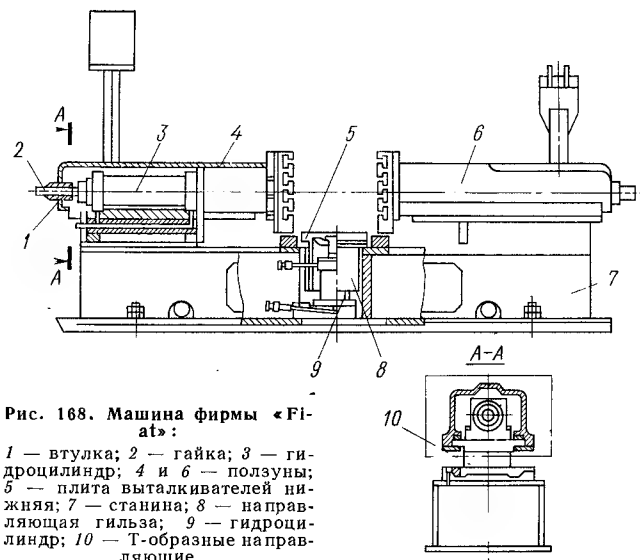


Рис. 168. Машина фирмы «Fata»:

1 — втулка; 2 — гайка; 3 — гидроцилиндр; 4 и 6 — ползуны; 5 — плита выталкивателей нижняя; 7 — станина; 8 — направляющая гильза; 9 — гидроцилиндр; 10 — Т-образные направляющие

струкции этой машины является большая жесткость и точность направляющих.

Гидравлической и электрической схемами предусмотрена возможность привода еще четырех металлических стержней.

Цикл работы машины, включая и перемещения стержней, автоматический.

Широкое распространение получили полуавтоматические машины для литья поршней автомобильных двигателей фирмы Fata (рис. 169). На станине коробчатого типа смонтированы механизмы 2 кокиля, центральных стержней, съемник 4 отливок и установки 3 армирующих пластин (вставок). Заливка поршней производится одновременно в два кокиля, каждый из которых состоит из двух подвижных половин, через которые проходят металлические пальцы, и трех нижних стержней, образующих внутреннюю полость поршня. Половины кокиля крепятся к кареткам, перемещаемым четырьмя гидроцилиндрами по призматическим направляющим.

Для создания сложной внутренней полости поршня служат подвижные пальцы и стержни. При закрытии кокиля вначале пальцы движутся совместно с боковинами стержня и после их смыкания дальнейшим ходом цилиндра досылаются в полость кокиля. Механизмы съема отливок и установки пластин состоят из аналогичных поворотных кронштейнов и захватывающих устройств.

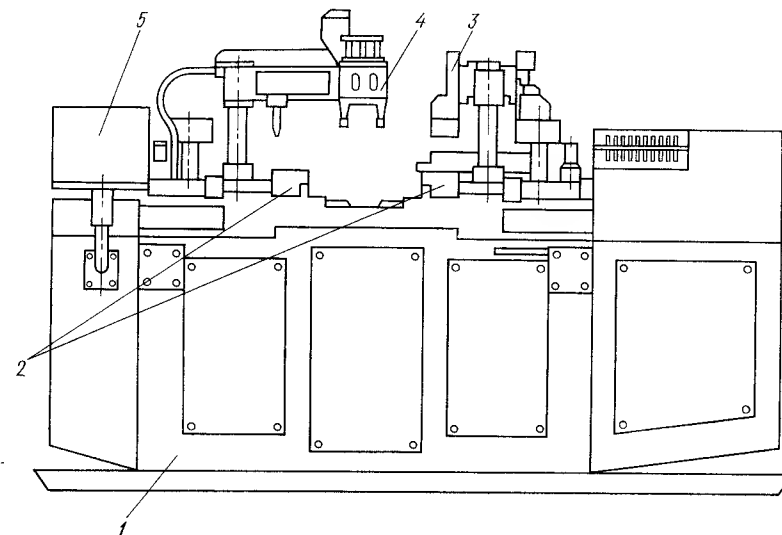


Рис. 169. Полуавтомат фирмы «Fata» для литья поршней:

1 — станина; 2 — механизм кокиля; 3 — механизм установки пластин; 4 — съемник отливок; 5 — пульт управления

Машина работает в полуавтоматическом режиме; привод — гидравлический, привод захватывающих устройств — пневматический.

Основные данные машины: размер рабочего места на боковых каретках для установки кокиля 270×110 мм; производительность 100—120 отливок в час; мощность электродвигателя 10 кВт; габаритные размеры $3100 \times 1420 \times 1980$ мм.

4. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Определение усилия запирания кокилей. К числу основных параметров, определяющих конструкцию кокильной машины, относится усилие запирания полуформ. От величины его во многом зависит принципиальная схема и конструктивное исполнение машины. Известно, что в разъемных кокилях вследствие взаимодействия формы с залитым металлом возникают силы, стремящиеся раскрыть кокиль. Источниками указанных сил являются динамическое воздействие струи заливаемого металла, статическое его давление, а также коробление кокиля в процессе заливки и расширение залитого в кокиль металла при структурных превращениях. Наиболее опасным является период заливки металла в форму, когда наружный слой отливки еще не успевает закристаллизоваться.

Количественная оценка давления заливаемого металла на стенки формы может быть произведена с помощью выражения [69, 53]

$$P = 2g\rho_1 HF, \quad (141)$$

где H — расстояние от поверхности литниковой чаши до центра тяжести сечения F отливки в плоскости разъема формы; g — ускорение свободного падения; ρ_1 — плотность заливаемого металла.

Расчеты показывают, что даже при литье сравнительно крупных чугуновых деталей (габаритными размерами 1000×1000 мм) величина P не превышает 40 кН. Значительно большие усилия требуются для предотвращения коробления кокиля в период заливки металла и образующегося вследствие этого зазора по плоскости разъема полуформ.

В наиболее общем случае кокиль представляет собой, как указывалось в гл. V, конструкцию, состоящую из рабочей части и обрамления. Такой кокиль можно рассматривать в первом приближении как свободно опертую по краям пластину. Исходя из этого, для кокиля с вертикальной плоскостью разъема величина образующегося к концу заливки прогиба Δ_m полуформы может быть приближенно найдена из уравнения [14, 100, 144]

$$\Delta_m = \frac{M}{D} \frac{16L^2}{\pi^4} \sin \frac{\pi l_1}{2L_1} \sin \frac{\pi l_2}{2L_2} \frac{1}{1+m^2} \sin \frac{\pi x}{L_1} \sin \frac{\pi y}{L_2}, \quad (142)$$

где L_1 и L_2 — высота и ширина рабочей плиты в положении вертикальной заливки; l_1 и l_2 — высота и ширина отливки в плоскости разъема в положении при заливке; $m = L_2/L_1$; x и y — координаты точки, в которой определяется прогиб (начало координат расположено в углу рабочей плиты, ось x направлена по вертикали: $0 \leq x \leq L_1$, $0 \leq y \leq L_2$); M — интенсивность распределенной моментной нагрузки, изгибающей полуформу; D — цилиндрическая жесткость рабочей плиты ($D = \frac{EX_2^3}{12(1-\nu^2)}$).

Необходимым условием для предотвращения коробления кокиля является приложение запирающего усилия, при котором [12]

$$\Delta_m - \Delta_p = 0,$$

где Δ_p — прогиб, возникающий от действия усилия запираания.

Входящие в правую часть уравнения (142) члены M и D зависят от толщины рабочей стенки кокиля. Значение M определяется по формулам (51) и (52).

Подбирая определенную толщину стенки кокиля, можно влиять на величину коробления и свести ее к $\Delta_m \leq \Delta_{\text{доп}}$, где $\Delta_{\text{доп}}$ — допускаемый прогиб полуформы, при котором отсутствует вытекание металла из формы. Из практики литья в кокиль известно, что при зазоре между полуформами в пределах 0,1—0,15 мм для алю-

миниевых сплавов и 0,3—0,4 мм для чугуна заливаемый металл из рабочей полости не вытекает.

Подбирая необходимую толщину стенки кокиля, при которой образующийся прогиб будет меньше $\Delta_{\text{доп}}$, можно отказаться от применения внешних запирающих усилий для предотвращения коробления кокиля. В этом случае усилие запираания рассчитывают из условия предотвращения перемещения подвижных частей под действием только динамического и статического напора заливаемого металла [формула (141)]. Такой метод расчета позволяет создать наиболее рациональную конструкцию кокильной машины.

Например, в кокиле с рабочей плитой размером 1000×800 мм и толщиной 55 мм зазор между половинами не будет превышать 0,2 мм, если приложить усилие запирающим механизмом машины около 2 МН. Последняя величина найдена по формуле работы [146]. В то же время при толщине стенки 90—95 мм отпадает необходимость приложения какого-либо усилия, так как коробление значительно меньше допустимого. Для плит такого размера достаточно обеспечить усилие запирающего механизма 100—150 кН, что предотвращает раскрытие кокиля под действием давления жидкого металла (с коэффициентом запаса около трех). Расчеты и практика показывают, что выбор X_2 по графику а) на с. 193 обеспечивает, как правило, соблюдение условия $\Delta_m \leq \Delta_{\text{доп}}$.

Определение усилия извлечения металлического стержня из отливки. На величину усилий извлечения металлических стержней из отливки оказывают влияние следующие факторы: температура отливки и стержня в момент извлечения; величина уклона, форма и размеры стержня; состав краски или обмазки, которыми покрыт стержень; чистота и твердость поверхности стержня; толщина стенки отливки; материал отливки (гл. IV). С увеличением времени выдержки стержня в отливке усилие увеличивается. При холодной форме возможно резкое увеличение усилия извлечения стержней. Для предотвращения этого необходимо разогреть кокиль и стержень до 475—575 К. При отсутствии смазки усилие увеличивается в 2—2,2 раза. Существенное влияние на усилие оказывает также способ подвода металла. В случае удара струи металла в стержень может произойти приваривание отливки.

Механизм силового взаимодействия отливки с формой рассмотрен в параграфе 7 гл. IV. В свете основных положений этого механизма силовое взаимодействие со стержнем протекает следующим образом [73, 74]. С увеличением времени толщина затвердевшей корочки и ее прочность увеличиваются. За промежуток времени Δt температура находящейся в кокиле отливки понизится на $\Delta T_1 = T'_1 - T_1$, где T'_1 — начальная температура образования корочки, оказывающей сопротивление усилию разрыва; T_1 — температура отливки в данный момент. За время Δt металлический стержень нагревается на $\Delta T_{\text{ст}}$ градусов и соответственно расши-

ряется на $\epsilon_{\text{ст}}$. В результате процесса усадки отливки и увеличения сопряженных размеров металлического стержня между ними возникает силовое взаимодействие, пропорциональное суммарной деформации:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_{\text{ст}},$$

где ϵ_1 — свободная усадка отливки при изменении температуры на величину ΔT_1 . Эта деформация является причиной затрудненного извлечения металлических стержней и возникновения в отливке напряжений σ . Влияние различных факторов на величину σ рассмотрено в параграфе 7 гл. IV.

Исходя из рассмотренных закономерностей, в работе [73] получена следующая зависимость между удельным усилием извлечения стержня $p_{\text{уд}}$ и величиной σ :

$$p_{\text{уд}} \geq \sigma (k - 1)(f - \operatorname{tg} \alpha) \cos^2 \alpha, \quad (143)$$

где k — отношение наружного диаметра (размера) отливки к внутреннему; f — коэффициент трения между поверхностью отливки и стержнем при расчетной температуре; α — уклон стержня.

По мере снижения температуры отливки и, следовательно, перехода металла в область упругих деформаций опасность ее разрушения из-за затруднения усадки увеличивается. Поэтому рекомендуется извлекать стержни при более высоких температурах, преимущественно в области пластических деформаций: для серого чугуна при температуре отливки в пределах 1135—1155 К, а для алюминиевых сплавов при температуре около 725 К. Большое влияние на $p_{\text{уд}}$ оказывает величина коэффициента трения f при температуре извлечения стержня. Величина f существенно зависит от состава смазки (покрытия) (см. рис. 116). Для графитовых смазок этот коэффициент наименьший, а с увеличением содержания жидкого стекла и маршалита значение f увеличивается.

Для расчетов усилий извлечения круглых металлических стержней из отливок из серого чугуна с учетом конкретных условий литья можно воспользоваться номограммой, приведенной на рис. 170,

где $T_{2\text{н}}$ — начальная температура поверхности кокиля и стержня перед заливкой; δ_1 — толщина стенки отливки; $T_{\text{ст}} - T_{2\text{н}}$ — разность температур стержня в момент извлечения и перед заливкой; T_1 — температура отливки, при которой извлекается стержень; K — отношение средней толщины стенки кокиля к средней толщине стенки отливки; α° — конусность стержня в градусах; f — коэффициент трения между отливкой и стержнем для красок различных типов: I — на основе графита, II — без облицовки (стержень смазан машинным маслом), III — графит + бентонит. Наклонные прямые на диаграмме соответствуют $T_{2\text{н}}$ при $K = 1$.

Порядок определения удельного усилия показан на номограмме стрелками для двух случаев: 1) $T_{2\text{н}} = 100^\circ \text{C}$, $T_{\text{ст}} = 150^\circ \text{C}$,

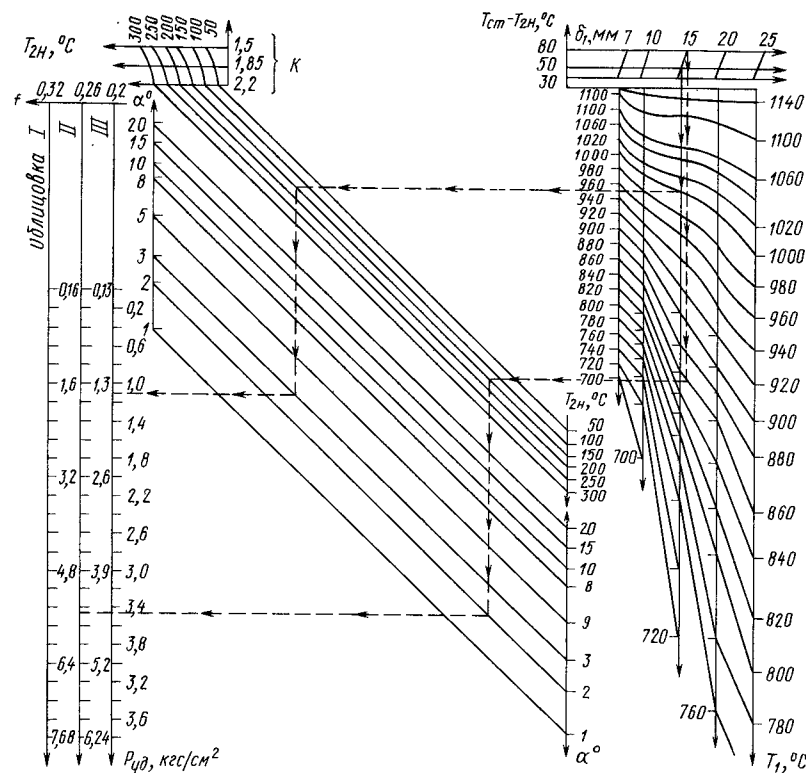


Рис. 170. Номограмма для определения усилий извлечения цилиндрических металлических стержней

$\delta_1 = 15 \text{ мм}$, $T_1 = 1000^\circ \text{C}$, $K = 1,5$, $\alpha^\circ = 3^\circ$ и $f = 0,2$; 2) $T_{\text{ст}} = 180^\circ \text{C}$, $T_1 = 860^\circ \text{C}$, $\alpha^\circ = 2^\circ$, $f = 0,26$ и остальные параметры — по предыдущему примеру. Величина $p_{\text{уд}}$, выраженная в кгс/см², в номограмме определена для круглой втулки. Для призматического стержня $p_{\text{уд}}$ умножают на коэффициент k_k , зависящий от конструкции и размеров стержня (рис. 171: 1 — линия для случая, когда отношение $1,5 > \frac{b}{a} > 1$; 2 — для круглых стержней; 3 — $b/a \geq 3$; a — ширина стержня, b — длина стержня, H — высота стержня).

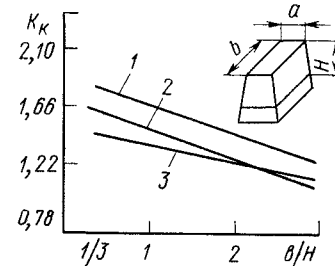


Рис. 171. График для определения коэффициента k_k — формы призматического стержня

5. КАРУСЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Восьмипозиционная машина мод. Л484 предназначена для литья из чугуна с шаровидным графитом деталей тракторных плугов. Рама 3 карусели (рис. 172) с восемью кокильными секциями 8 и механизмами 7 металлических стержней установлена на мощную пустотелую колонну 1. Масса карусели воспринимается упорным шарикоподшипником. В радиальном направлении она центрируется по колонне втулками скольжения. Снизу к поворотной раме прикреплено зубчатое колесо, находящееся в зацеплении с шестерней гидравлического реечного механизма привода 2 карусели. Вращение сообщается карусели при ходе рейки вперед; при этом находящаяся в зацеплении с рейкой шестерня соединена с валом кулачковой муфты. При движении рейки назад (муфта

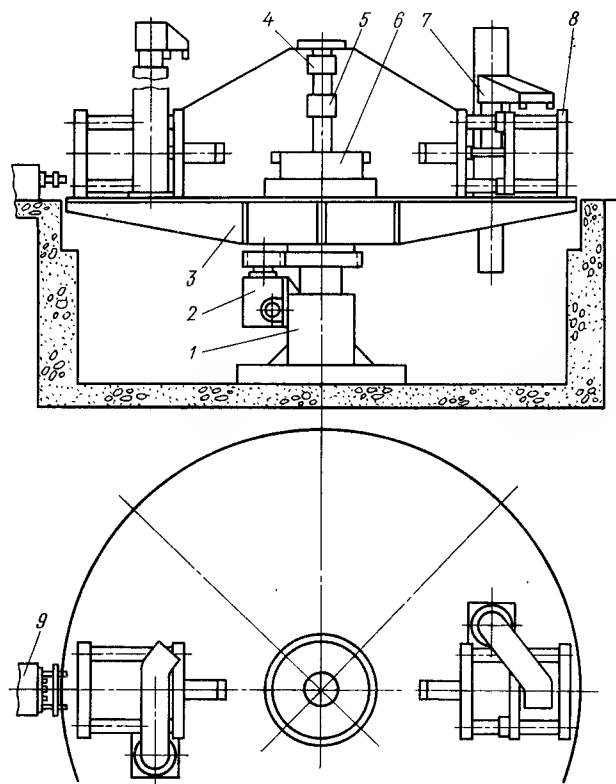


Рис. 172. Восьмипозиционная карусельная машина мод. Л484 для литья стоек тракторных плугов:

1 — колонна; 2 — привод поворота; 3 — рама карусели; 4 — маслораспределительная колонка; 5 — водораспределительная колонка; 6 — командоаппарат с гидрораспределителями; 7 — механизм металлических стержней; 8 — кокильная секция; 9 — фиксатор

выведена из зацепления с шестерней) осуществляется холостой ход. Карусель в это время удерживается фиксатором 9.

Существенную роль для конструкции кокиля с удлиненным металлическим стержнем (см. рис. 72) играет система его охлаждения. Вода подается через водораспределительную колонку 5 к коллекторам, от которых поступает в половинки кокилей и стержень через диафрагменные водяные клапаны. Открытие клапанов производится на первой позиции только в случае, если в кокиль залит металл. Закрытие клапана подачи воды в металлический стержень происходит на второй позиции.

Основные данные машины: масса отливаемых чугунных деталей до 50 кг; производительность 120 шт/ч; размер подкокильных плит 600×800 мм; усилие смыкания кокилей 100 кН, диаметр карусели 6300 мм.

Восьмипозиционная машина мод. Л390 предназначена для производства тонкостенных отливок из серого чугуна типа крышек электродвигателей, насосов и т. п. Она представляет собой карусель с вертикальной осью вращения (рис. 173).

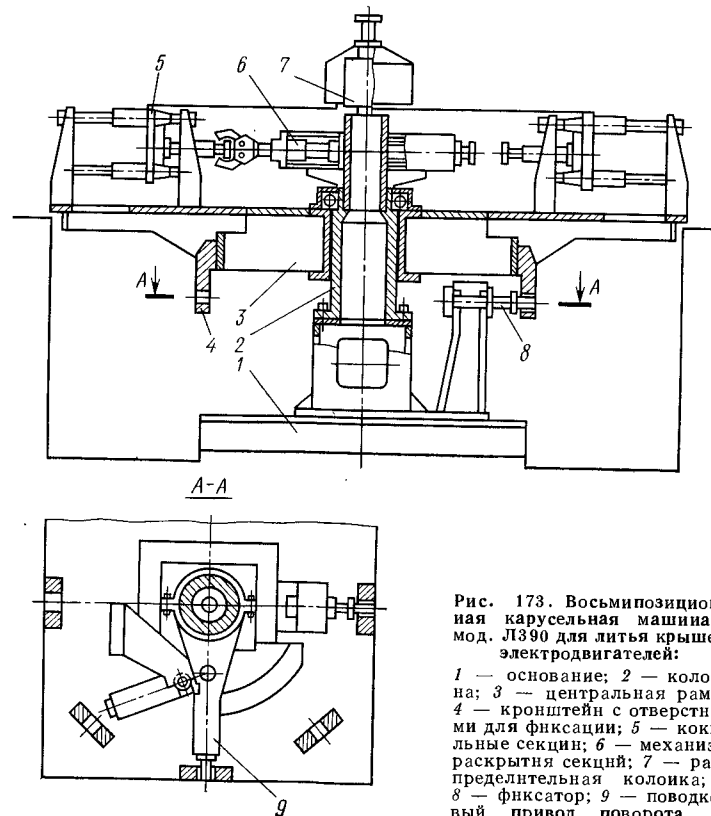


Рис. 173. Восьмипозиционная карусельная машина мод. Л390 для литья крышек электродвигателей:

1 — основание; 2 — колонна; 3 — центральная рама; 4 — кронштейн с отверстиями для фиксации; 5 — кокильные секции; 6 — механизм раскрытия секций; 7 — распределительная колонка; 8 — фиксатор; 9 — поводковый привод поворота

Отличительной особенностью машины является конструкция привода кокильных секций. Кокильные секции не имеют индивидуальных силовых цилиндров. Раскрытие и закрытие кокилей, а также сжатие половин кокиля на позиции заливки производятся с помощью стационарного механизма, расположенного в средней части карусели.

Механизм имеет четыре гидравлических цилиндра. Два из них — цилиндр закрытия и цилиндр сжатия кокиля — неподвижны, так как указанные операции производятся в период остановки карусели.

Конструкция привода кокильных секций позволяет уменьшить число цилиндров, золотников и гидрокоммуникаций. При некотором снижении оперативности работы секций (так как их раскрытие и закрытие происходит на определенных позициях) надежность работы машины повышается, а масса ее может быть уменьшена. Чем большее число позиций имеет машина, тем выгоднее применение стационарного привода кокильных секций.

Основные данные машины: масса отливаемых чугунных деталей 4 кг; производительность 240 шт/ч; размеры подкокильных плит 830×545 мм; расстояние между плитами в сомкнутом состоянии 300 мм; ход подкокильной плиты 240 мм; габаритные размеры машины 4200×3500 мм.

Шестнадцатипозиционная машина мод. Л430М (рис. 174) предназначена для отливки ребристых станин электродвигателей в водоохлаждаемых кокилях (схема кокиля на рис. 92). Наружная

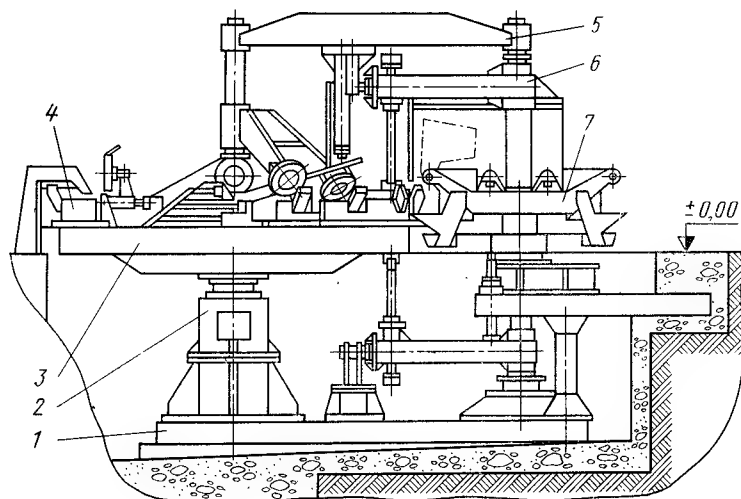


Рис. 174. Шестнадцатипозиционная карусельная машина мод. Л430М для литья станин электродвигателей:

1 — основание; 2 — колонна; 3 — платформа карусели; 4 — нижняя часть кокиля; 5 — траверса; 6 — консоль; 7 — заливочная машина

поверхность отливки и литниковая система оформляются корпусом кокиля и крышкой. Внутренняя полость оформляется металлическим стержнем.

Карусельная платформа состоит из пяти элементов: центрального базового барабана, надеваемого на колонну 2, и четырех прикрепленных к нему секторов, образующих наружный пояс, на котором сверху располагаются кокильные секции, а на боковой поверхности — ролики привода и фиксации карусели и башмаки опорных роликов, воспринимающих вертикальные нагрузки от выталкивателя отливки из кокиля.

Кокильная секция состоит из фасонного кольца, в которое устанавливается корпус кокиля 4 (см. рис. 92), и кронштейна с поворотной траверсой, предназначенной для крепления крышки кокиля 11. Траверса снабжена рычагом с роликом для закрытия крышки по копиру и нижним — для открытия крышки стационарным цилиндром. Копир крепится к центральной колонне машины. Выталкивание отливки из кокиля приводится снизу на третьей позиции гидроцилиндром. Механизм привода и фиксатор карусели укреплены на самостоятельных фундаментах. Механизм привода представляет собой качающуюся балку, по направляющим которой возвратно-поступательно перемещается каретка с захватом.

Основные данные машины: масса отливаемых чугунных деталей 30 кг; производительность 110 шт/ч; диаметр карусели 5530 мм.

Четырехпозиционная машина мод. ЛМВ450 предназначена для отливки чугунных радиаторных секций. Отличительной особенностью машины (рис. 175) является поворот карусели вокруг горизонтальной оси.

Конструкция машины позволяет осуществить заливку кокилей в любом их положении, в том числе и в наклонном. Отливки удаляются автоматически с помощью толкателей и по склuzu 3 направляются в бункер. При выталкивании отливки кокиль находится в вертикальном положении. Каждая из четырех секций 1 представляет собой пневматический станок, имеющий неподвижную и подвижную подкокильные плиты. Кокильная секция монтируется на поворотной раме 2, ось которой закреплена в станине 5. Привод 7 периодического поворота карусели состоит из электродвигателя, муфты с электромагнитным тормозом и редуктора, связанного с валом машины открытой зубчатой передачей 6.

Формы охлаждаются вентилятором 4. Возможно также применение дополнительного водяного охлаждения.

Двенадцатипозиционная машина мод. А48.01 предназначена для производства отливок из чугуна с шаровидным графитом ступиц автоприцепов (рис. 176). Установка стержней и заливка производятся в кокиль при горизонтальном разъеме. Операции вы-

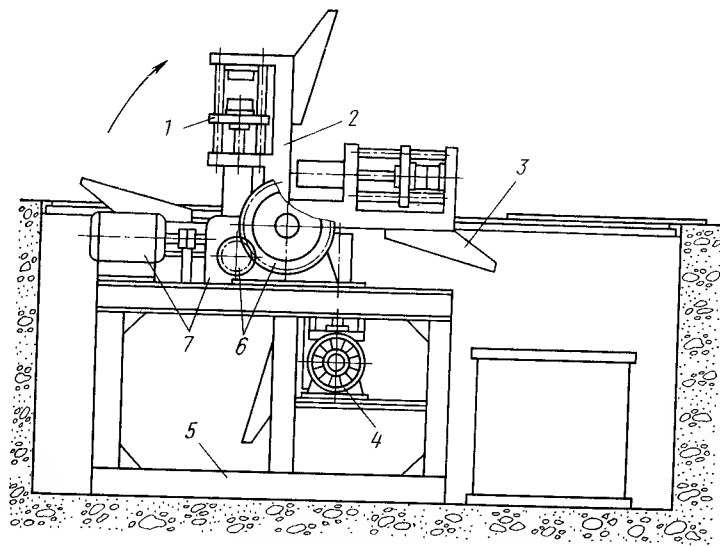


Рис. 175. Четырехпозиционная карусельная машина мод. ЛМВ450 для литья радиаторов:
1 — кокильная секция; 2 — поворотная рама; 3 — склиз для отливок; 4 — вентилятор системы воздушного охлаждения; 5 — станина; 6 — зубчатая передача; 7 — электро-механический привод поворота

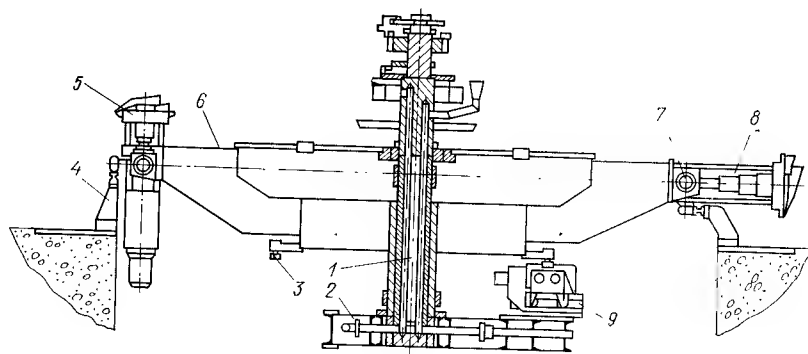


Рис. 176. Двенадцатипозиционная карусельная машина для литья ступиц автоприцепов:

1 — колонна; 2 — рама; 3 — ролики; 4 — копир; 5 — плита неподвижная; 6 — сектор; 7 — подшипник; 8 — кокильная секция; 9 — привод поворота

бивки отливки и обслуживания кокиля осуществляются при вертикальном расположении плоскости разъема.

На шести гранях карусели установлены секторы 6 с закрепленными на них подшипниками 7, на которых подвешиваются кокильные секции 8, поворачивающиеся под действием копира 4 на 90° . Кокильные секции выполнены с подвижной передней и неподвижной задней плитами и снабжены индивидуальными гидроцилиндрами (по два на каждой секции), приводящими в движение плиту. На неподвижной колонне сверху карусели установлен стационарный механизм выбивки стержней и выталкивания отливки из неподвижной половины кокиля. Для выталкивания отливки из подвижной половины кокиля имеется стационарный механизм с захватным устройством, предотвращающим передачу усилия выталкивания на секцию. Поворот карусельной кокильной машины осуществляется пульсирующим приводом 9, установленным на опорной раме.

Основные данные машины: производительность 115 шт/ч; металлоемкость кокиля 26 кг; ритм работы 18—22 с (в том числе поворот 7 с), длительность остановки 11—15 с; размеры рабочего места на плитах для крепления частей кокиля 630×500 мм.

Зарубежные карусельные машины. Итальянская фирма «Fata» создала специальную шестипозиционную карусельную машину для крупносерийного производства автомобильных алюминиевых деталей, в том числе поршней диаметром до 150 мм. Машина имеет производительность 150 отливок в час и работает в комплексе с пневматической раздаточной печью и манипуляторами для установки стержней и съема отливок.

Привод периодического поворота карусели представляет собой систему гидромотор—редуктор—зубчатая цилиндрическая передача. Для остановки и гашения инерционных сил на сварной опорной раме установлено демпфирующее гидропневматическое рычажное тормозное устройство. Движение частей кокильных секций осуществляется от стационарно расположенных приводов. Для лучшего заполнения формы металом и вентиляции секции на позиции заливки наклоняются на определенный угол. Штоки стационарных гидроцилиндров привода секций снабжены наконечниками грибовидной формы, входящими на рабочей позиции в охватывающие наконечники штанг механизмов секций. В центре машины установлен коллектор для подвода к секциям охлаждающей воды и газа для разогрева кокилей в начале работы.

Гидропривод работает на негорючей жидкости. Давление рабочей жидкости до 10 МПа.

Четырехпозиционная машина фирмы «Voisin» (Франция) предназначена для литья тормозных цилиндров из алюминиевого сплава. Платформа машины непрерывно вращается вокруг цент-

ральной колонны. Привод вращения осуществляется от электродвигателя через вариатор и червячный редуктор при помощи роликов с резиновыми бандажами. Один из этих роликов через рычаг прижимается к ободу платформы пневмоцилиндром.

Каждая кокильная секция снабжена горелками для предварительного разогрева кокилей. Передача воздуха и газа в горелки осуществляется через специальную систему в виде водяного затвора, смонтированного на центральной колонне.

Вверху платформы, на четырех полых лапах, через которые вода поступает к кокильным секциям, установлен бак с охлаждающей водой. От кокильных секций вода возвращается в этот бак. Включение и отключение насоса перекачки воды производится от специального термодатчика; пополнение бака осуществляется с помощью поплавкового клапана.

На каждой секции установлено два кокиля. В одном кокиле отливаются две детали.

Основные данные машины: производительность 220 шт/ч; ход боковых подкокильных плит (каждой) 120 мм; ход выталкивателей 50 мм; ход механизма верхних стержней 140 мм; габаритные размеры: диаметр карусели 3600 мм, высота над уровнем пола 2600 мм, полная высота 3200 мм.

Пятипозиционная машина этой же фирмы предназначена для литья сложных деталей типа головок блока цилиндров автомобильных двигателей. Машина работает в комплексе с двухтигельной раздаточной печью, заливочным устройством и механизмом съема отливок.

Карусель имеет конструкцию, аналогичную вышеописанной чет рехпозиционной. Кокильная секция пятипозиционной машины состоит из следующих основных узлов: станины; механизма боковых (правой и левой) плит; поддона с механизмом выталкивания отливок; верхнего стержня с механизмами его перемещения и устройством для поворота траверсы; механизма наклонных стержней; механизма торцовых стержней (предусматривается возможность установки переднего и заднего торцовых стержней); механизм перемещения мерной заливочной чаши. В связи с большим числом подвижных частей кокиля секции имеют сложную систему управления. Команды на перемещение отдельных частей кокиля подаются с помощью пневматических датчиков, переключающих золотники.

Заливка металла производится манипулятором из специального ковша. Ковш, перемещаясь вертикально вниз, через отверстие в днище заполняется металлом. Команда на остановку вертикального перемещения вниз поступает от контактов при их соприкосновении с металлом. После этого ковш поворачивается и металл перетекает в закрытую полость ковша. Далее следует подъем ковша и его перемещение на специальной подвеске к заливочной чаше, установленной на каждом станке (секции). Путем наклона

заливочной чаши при помощи гидроцилиндра металл с заданной скоростью заливается в кокиль.

Съем отливки осуществляется с помощью съемника. На этой же позиции обдувается воздухом кокиль и разогревается мерная чаша (на станке) с помощью стационарно установленной газовой горелки. Далее отливка устанавливается в специальное приспособление для отбивки литниковой системы, после чего укладывается в корзины и направляется по конвейеру.

Основные данные машины: производительность 40—50 шт/ч; ход боковых подкокильных плит (каждой) 250 мм; ход выталкивателей 50 мм; ход механизма верхних стержней 150 мм; диаметр карусели 6000 мм.

Предприятием VEB Eisenhammerwerk Dresden—Dölzschen (ГДР) и фирмой Metalna—Maribor (СФРЮ) разработана карусельная машина типа «Edkomatic». Машины «Edkomatic» выпускают двух исполнений — двенадцати- и шестнадцатипозиционными. Плоскость разъема кокилей горизонтальная. Подвижной является верхняя полуформа. В кокильных секциях предусмотрены гидроцилиндры для привода нижнего и боковых стержней. Поворотный стол имеет электромеханический привод.

Машина работает следующим образом. Сразу после окончания заливки кокиля оператор-заливщик нажатием педали выключателя поворачивает машину на $\frac{1}{12}$ (или $\frac{1}{16}$) окружности. Реле времени, установленные на требуемую выдержку охлаждения отливки, включаются, и после того, как истечет установленное время, они пускают в действие рабочие цилиндры в той последовательности, в какой срабатывают реле. Цилиндры могут приводиться в действие как на остановке, так и во время вращения карусели. Отливка опускается на определенную высоту (высоту можно регулировать), на которой нижний цилиндр отрывает нижнюю половинку кокиля от отливки и отводит ее в крайнее положение. В заранее установленной точке отливки выталкиваются в контейнер либо на конвейер.

Заккрытие кокилей возможно в различных позициях с помощью кулачков, замыкающих выключатели закрытия кокиля. Кокили закрываются только после того, как оптический пирометр замерит их температуру. В случае, если температура ниже или выше заданной, автоматически включается оптический или звуковой сигнал.

Кокильная секция снабжена тремя рабочими цилиндрами; цилиндры можно использовать каждый отдельно или комбинированно.

Цилиндры могут работать с кокилями, состоящими из двух, трех и четырех составных частей.

Каждая кокильная секция имеет индивидуальную панель управления с рядом пусковых кнопок, с помощью которой обеспе-

чивается проверка работы механизмов установки и ручное управление ими.

Основные данные машины:

Параметры	Двенадцатипозиционная	Шестнадцатипозиционная
Размеры отливаемых деталей, мм	600×600×400	380×380×400
Усилие смыкания (размыкания) кокиля, кН	До 100	До 100
Машинное время для изготовления отливки массой 5 кг, с	8—15	8—15
Габаритные размеры, мм:		
диаметр карусели	6400	6400
диаметр по осям кокильных секций	5600	5800
высота над уровнем пола	2900	2900
глубина от уровня пола	2200	2200
высота заливки над уровнем пола	550	550

6. КОКИЛЬНЫЕ КОНВЕЙЕРЫ

На заводе «Водоприбор» (г. Москва) разработан кокильный конвейер для литья разногабаритных чугуновых деталей массой от 3 до 100 кг с различной серийностью выпуска. Транспортная часть установки выполнена в виде напольного тележечного конвейера, несущего кокильные машины трех типов.

Каждый тип машины рассчитан на определенную группу отливок, получаемых в чугуновых кокилях с вертикальной плоскостью разъема.

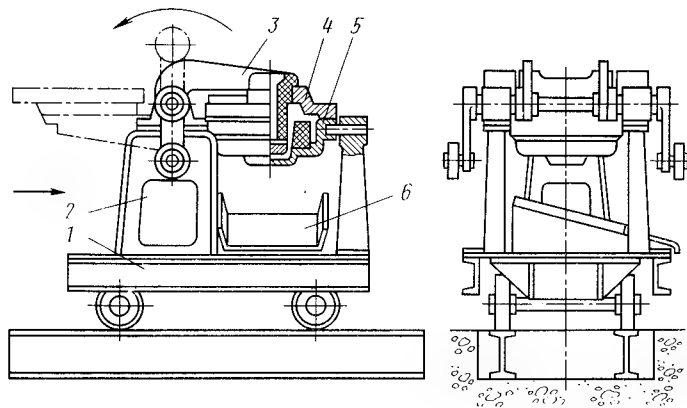


Рис. 177. Секция кокильного конвейера:

1 — тележка; 2 — корпус; 3 — рычаг с роликом; 4 — крышка кокиля; 5 — кокиль; 6 — склиз

Подача сжатого воздуха к машинам осуществляется с помощью распределительного телескопического устройства. Извлеченные из кокилей отливки попадают по склизу в теплоизолированные контейнеры, расположенные в туннеле. В целях интенсификации режима работы применена система охлаждения кокилей в виде охлаждающего экрана с водяной завесой.

Основные данные установки: масса отливок 3—100 кг; шаг платформы 1600 мм; скорость перемещения от 1,5 до 6 м/мин; усилие смыкания кокилей 50 кН; годовая производительность (при односменной работе) 6000 т отливок.

На рис. 177 показана секция кокильного конвейера для литья колес шахтных вагонеток. Она состоит из замкнутого напольного конвейера, на тележках которого установлены кокильные секции. Кокильные секции имеют корпус 2, в котором на двух взаимно перпендикулярных осях установлены кокиль 5 (ось поворота совпадает с направлением движения конвейера) и крышка кокиля 4 (ось поворота перпендикулярна направлению движения). Корпус закреплен на тележке 1 конвейера.

Залитые формы передвигаются к устройству для автоматического раскрытия крышки. Ролики рычагов крышки наезжают на неподвижные копиры. Крышка, соединенная с изогнутыми рычагами, повернувшись на угол, превышающий 90°, под действием собственного веса продолжает поворачиваться до упора в корпус секции. Плавность опускания крышки достигается с помощью контркопиров, по которым по мере передвижения конвейера перемещаются ролики. Раскрытие крышки происходит через 30—40 с после окончания заливки. Отливка выбивается из корпуса кокиля через 5—6 мин (при повороте его на 180°). После выбивки отливки корпус и крышку кокиля, когда они остынут (до 520—570 К), очищают металлической щеткой, обдувают сжатым воздухом и при дальнейшем движении конвейера окрашивают с помощью автоматического пульверизатора. Последующими операциями являются установка песчаных стержней и закрытие крышки.

Кокильные конвейеры получили широкое распространение при производстве из серого чугуна отливок фасонных частей для изделий сантехники.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ЛИНИИ

1. ЛИНИЯ ЛИТЬЯ В ОБЫЧНЫЕ КОКИЛИ

Наибольшая эффективность достигается при производстве отливок на автоматизированных линиях. Такие линии применяют в условиях крупносерийного и массового производства. Они являются в основном специализированными. При выпуске более широкой номенклатуры отливок успешно применяют поточные линии, состоящие из стационарных однопозиционных полуавтоматических кокильных машин [53]. Автоматизированные линии обычно проектируют на базе многопозиционных карусельных кокильных машин. В линии встраивают заливочные машины, устройства для очистки кокилей и нанесения защитных покрытий, а также механизмы, осуществляющие ориентированную передачу стливок из кокиля в устройство для автоматического отделения литниковой системы и выбивки песчаных стержней. Перечисленное оборудование, связанное единой системой управления, составляет основу линий литья в кокили.

В линии могут входить также плавильные агрегаты, автоклавы для обработки чугуна магнием, агрегаты для термической обработки отливок, транспортные устройства для подачи жидкого металла, передачи отливок на финишные операции и удаления технологических отходов, установки и приборы для контроля отливок, оборудование для очистных операций.

Линия мод. АЗ5 для литья из чугуна с шаровидным графитом стоек тракторных плугов. Линия (рис. 178) многие годы успешно эксплуатируется на Одесском заводе сельскохозяйственного машиностроения им. Октябрьской революции (разработана в НИИСЛ) [98].

Линия состоит из четырех участков: плавильного, заливочно-кокильного, термообработки и очистки отливок. Жидкий чугун в ковшах емкостью 500 кг передается для модифицирования в камеры 5, а затем поступает к двухпозиционной заливочной машине 3. Ковши транспортируются с помощью винтовых подвесок с механизированным приводом перемещения и подъема ковша. Металл заливается в кокили, установленные на восьми- или шестипозиционных карусельных машинах 7 и 1. Управление заливочной и карусельной кокильной машинами дистанционное и осуществляется оператором с общего пульта 2. Отливки извлекаются из кокиля манипулятором 8 и подаются в механизм 9 для отбивки литниковой системы и далее по конвейеру 10 поступают на приемный стол 11, где манипулятором 12 укладываются на поддоны термоагрегата. Отожженные отливки после частичного охлаждения в баке 17 поступают на дробеметную очистку и зачистку шлифовальными кругами.

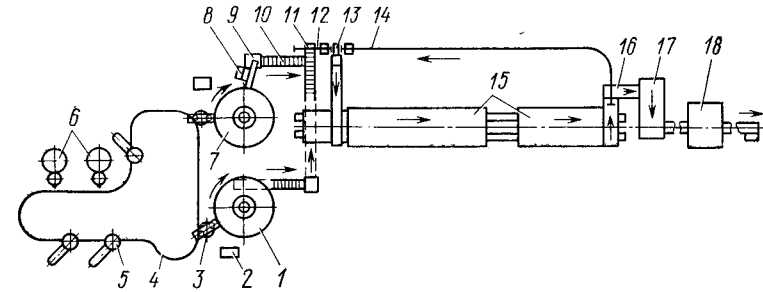


Рис. 178. Комплексно-механизированная линия литья стоек тракторных плугов: 1 и 7 — кокильные карусельные машины; 2 — пульт управления; 3 — заливочная машина; 4 — монорельс; 5 — камера модифицирования; 6 — вагранки; 8 — манипулятор; 9 — механизм отбивки литников; 10 — конвейер; 11 — приемный стол; 12 — манипулятор укладки горячих отливок на поддоны; 13 — поддон; 14 — монорельс возврата поддонов; 15 — термоагрегат; 16 — кантователь поддонов; 17 — бак охлаждения; 18 — дробеметная камера

В линии попеременно работают две карусельные кокильные машины: шестипозиционная пневматическая машина мод. Л125 восьмипозиционная гидравлическая машина мод. Л484 (представлена в виде схемы на рис. 172). Внешний вид заливочно-кокильного участка линии со стороны машины мод. Л484 показан на рис. 179. На переднем плане видна заливочная машина.

Извлечение отливок из кокиля и передача их в механизм для отбивки литниковой системы производится выталкивателем и манипулятором. После захвата отливки клещами манипулятора включается гидроцилиндр выталкивателя. Штыри выталкивателя идут вперед и через знаковые гнезда неподвижной половины кокиля, в которые устанавливаются песчаные стержни, выталкивают

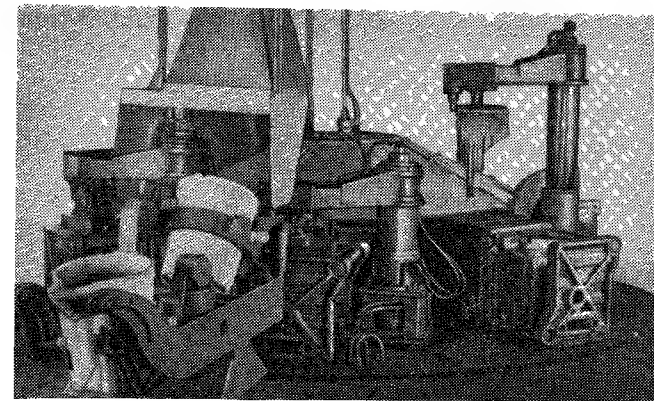


Рис. 179. Заливочно-кокильный участок линии литья стоек тракторных плугов

отливку. Далее манипулятор переносит ее на приемник механизма 9 (см. рис. 178) автоматического отделения литников. Там отливка захватывается скобой за среднюю часть, клещи манипулятора разжимаются и возвращаются в исходное положение.

После отбивки литниковой системы отливка скатывается по склизу на конвейер 10, по которому передается к приемному столу 11. Отходы проваливаются в зазор между полотном конвейера и металлоконструкцией стола, а детали соскальзывают в определенном положении на наклонный стол. Оператор включает подъем стола, отливка захватывается клещами гидравлического манипулятора 12. Манипулятор имеет цилиндры подъема и разворота на 180° и механизм перемещения по бирельсовому пути от приемного стола к поддону.

Нагруженный отливками поддон 13 подается с помощью подъемно-поворотного стола и механизма подачи в загрузочную зону термоагрегата 15 между толкателем и заслонкой печи.

Отжиг производится в механизированном термоагрегате 15, состоящем из двух проходных двухрядных печей (для первой и второй стадий термической обработки) и водяной ванны. Перемещение поддонов с отливками внутри печей, выгрузка отливок и возврат порожних поддонов под загрузку полностью автоматизированы.

Техническая характеристика линии: масса отливаемых деталей до 50 кг; производительность 120 шт/ч; емкость различного ковша 500 кг, число обслуживающих рабочих в смену 9 чел.

Особенностью линии является жесткая связь между ее отдельными механизмами, а также усложненная схема передачи отливок от механизма отбивки литниковой системы к манипулятору для укладки отливок на поддоны термоагрегата. Наличие здесь конвейера, на котором отливки теряют ориентированное положение, значительно усложнили конструкцию манипулятора. К недостаткам линии следует также отнести наличие ряда ручных операций: окраска и очистка кокилей, установка стержней. Применение в гидросистеме линии минерального масла иногда приводит к возгораниям в зоне заливки.

Линия мод. А58 для изготовления чугуновых станин электродвигателей 5-го габарита (II на рис. 180). Линия разработана на базе шестнадцатипозиционной карусельной кокильной машины мод. Л430М (см. рис. 174).

Заливка металла в кокили осуществляется из ковшей, установленных в кассеты двухпозиционной ковшовой заливочной машины (рис. 180). Металл периодически подается в ковш из барабанного обогреваемого газом миксера, смонтированного рядом с заливочной машиной. Вытолкнутая из кокиля отливка манипулятором 13 передается на конвейер, который переносит ее к механизму от-

бивки литника 10. Далее отливка подается к манипулятору 11, который устанавливает их на загрузочные тележки термоагрегата 12, состоящего из двух проходных электропечей с роликовым подом. Загрузочными тележками отливки поочередно подаются к каждой печи и проталкиваются в нее гидравлическим толкателем.

Прошедшие отжиг отливки попадают в душирующую камеру, установленную в торце термоагрегата, где охлаждаются до 70—80° С. Далее отливки передаются ленточным конвейером в отделение зачистки и контроля литья. Основные агрегаты линии имеют гидравлический привод от общей насосной установки. Линией управляет оператор с центрального пульта управления 6.

Техническая характеристика линии: производительность 100 шт/ч (8000 т/год); масса отливки 27,5—31,5 кг; емкость заливочного ковша 500 кг; установленная мощность 130 кВт; габаритные размеры 35×9,45 м.

Линия мод. А57 для изготовления щитов и лап электродвигателей. В состав линии (I на рис. 180) входят две поочередно работающие восьмипозиционные карусельные кокильные машины 4, пластинчатый транспортер 5 непрерывного действия для переноса

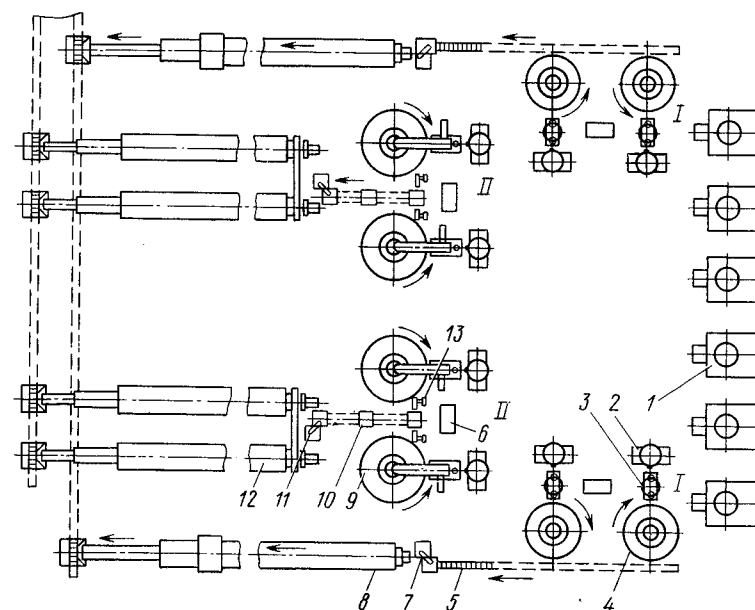


Рис. 180. Автоматизированные линии для литья деталей электродвигателей:

I — линия для литья щитов; II — линия для литья станин; 1 — плавильные тигельные печи; 2 — газовый миксер; 3 — ковшовая двухпозиционная машина; 4 — карусельная кокильная машина для подшипниковых щитов; 5 — транспортер; 6 — пульт управления; 7, 11, 13 — манипуляторы; 8 и 12 — термоагрегаты; 9 — карусельная машина для станин; 10 — механизм отбивки литников

отливки к термоагрегату 8, манипулятор 7, термоагрегат с камерой охлаждения.

Заливка чугуна в кокили производится двухпозиционной заливочной машиной 3 из ковшей емкостью 100 кг. Ковши пополняют из рядом стоящих миксеров 2 емкостью 2 т.

Отлитые детали выталкиваются из подвижной половины кокиля и падают в ориентированном положении на пластинчатый транспортер. При этом происходит отделение литников. Отливки и литники подаются к загрузочному склизу, устроенному таким образом, что отливки попадают в термоагрегат, а литники проваливаются в специальную емкость.

Линией управляет оператор с центрального пульта. Линия проста и надежна в эксплуатации.

Основные данные линии: производительность 200—220 заливок в час; масса отливаемых деталей 3—8 кг; размеры подкокильных плит, мм: ширина 970, высота 450; ход плиты 230 мм; усилие смыкания кокилей 500 кН (5000 кгс); габаритные размеры линии (длина×ширина) 42×17 м.

Линия мод. А48 для литья ступиц автомобильных прицепов. По своей компоновке она несколько отличается от описанных выше линий. В состав линии входят: камера-автоклав, двухпозиционная заливочная машина, двенадцатипозиционная карусельная кокильная машина (см. рис. 176), выбивная решетка, конвейер, электротали для транспортировки металла с помощью тельферов и две автоматизированные рольганговые электропечи.

Жидкий чугун в ковшах емкостью 350 кг транспортируется от вагранок электроталей сначала к камере-автоклаву для модифицирования чугуна, а затем к двухпозиционной заливочной машине. Операции, выполняемые на карусельной машине, ясны из ее описания (см. гл. XIX).

Выталкиваемые из кокилей отливки соскальзывают по наклонному желобу на выбивную решетку. После выбивки стержней отливки попадают на цепной транспортер, который подает их к загрузочному устройству печей.

Загрузочное устройство подает отливки в контейнеры, поочередно заталкиваемые в две рольганговые электропечи. На выходе из печей отливки выгружаются из опрокидываемых контейнеров в емкость, куда подается вода для охлаждения отливок, а из нее цепным конвейером передаются в очистное отделение. Порожние контейнеры по конвейерам подаются к загрузочному устройству.

Основные данные линии: производительность 115 отл/ч; металлоемкость кокилей 26 кг; привод основных агрегатов линии — гидравлический; габаритные размеры линии в плане (длина×ширина) 23×9 м.

2. МЕХАНИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАЛИВКИ КОКИЛЕЙ

Технико-экономические предпосылки механизации заливки. К основным преимуществам машинной заливки следует отнести общее повышение эффективности всего комплекса технологического оборудования линии, участка и цеха. Применение механизированной и в особенности автоматизированной заливки открывает большие возможности экономии металла, достигаемой уменьшением массы литниковой системы, ликвидацией сплесков и сливов, сокращением брака, а также уменьшением массы отливок, стабилизацией их размерной и массовой точности [136]. Механизированная заливка позволяет снизить брак (по вине заливщиков) вследствие стабилизации процесса заливки, ликвидации недоливов, уменьшения газовых и шлаковых включений и т. д. В отдельных случаях брак может быть снижен на 50% [75].

Экономическая эффективность механизированной заливки зависит от производительности кокильной машины, типа применяемой заливочной машины, металлоемкости форм, степени использования линии.

Значение механизации и автоматизации заливки не ограничивается экономическими показателями. Важнейшим преимуществом является ликвидация тяжелого ручного труда в зоне с повышенной температурой и загазованностью, возможность удалить человека из опасной зоны и создать ему нормальные санитарно-гигиенические условия труда.

Особенности и требования к заливочным устройствам. На выбор способа вылива расплава, системы дозирования и других важнейших параметров заливочных устройств определяющее влияние оказывают следующие особенности заливки кокилей: узкий интервал допустимых колебаний расходов (по массе) расплава (не более 2% [168]); необходимость снижения скорости заливки в конце процесса в связи с затрудненной вентиляцией полости металлической формы; разнообразие программ заливки вследствие применения литниковых систем с различными функциями и конструктивными особенностями.

Успешному решению механизации и автоматизации заливки способствует выполнение ряда требований, предъявляемых к литейным формам и транспортным средствам для них [136]: унификация места расположения заливочной чаши и ее размеров, а также места расположения выпора (при его наличии); фиксированное расположение кокиля относительно транспортного средства (карусельной машины или рольганга) и заливочного устройства.

Классификация устройств для заливки. В связи с многообразием особенностей процесса заливки, требований к заливочным устройствам и связанными с ними транспортными средствами, конструк-

ций кокильных машин и линий существует большое количество различных видов заливочных устройств — машин, установок, печей. Заливочные машины классифицируют на две группы по признакам устройства и признакам назначения. В качестве основных признаков устройства принят способ вылива расплава, система дозирования и регулирования расхода расплава. В качестве основных признаков назначения приняты конструктивное исполнение, компоновка с дополнительными средствами, вид заливаемого сплава и поддержание температуры расплава.

По виду заливаемого сплава заливочные установки разделяются на установки для заливки чугуна, алюминиевых сплавов и стали; по методу дозирования: установки с дозированием по заполнению формы, по массе, по продолжительности вылива и по объему дозы металла. По конструктивному исполнению различают заливочные установки с наклоняемой емкостью (ковшовые), с пневматической выдачей металла, магнитогидродинамические, со стопорной раздачей металла.

Дозирование может быть осуществлено: 1) по объему: мерным ковшом, мерным приспособлением, вытеснением металла пробкой, мерной чушкой, вытеснением металла газом; 2) по массе: взвешиванием металла в ковше, взвешиванием формы; 3) по продолжительности: с помощью реле времени при выливе металла через носок секторного ковша; выливом через калиброванную втулку из стопорного ковша; заливкой с помощью поворотных желобов, а также с помощью конических ковшей, поворачиваемых по копиру; 4) по заполнению кокиля с помощью контроля уровня металла в выпоре оптическим реле, тепловым реле, приборами изотопного контроля, заполнением кокиля под низким давлением и вакуумным всасыванием, с помощью контактного датчика, вмонтированного в кокиль.

При заливке кокилей чугуном наибольшее распространение получили установки с наклоняемой емкостью, с пневмовыдачей металла и электромагнитные.

Заливочные установки с наклоняемой емкостью. На рис. 181 показана схема установки заливочной машины мод. ЛЗ96 с ковшами емкостью 75 кг комплектно с газовым миксером емкостью 2 т. Этот комплекс входит в состав линии литья щитов, описанной в предыдущем параграфе и показанной на рис. 180. Кроме гидроцилиндра 6 наклона ковшей для заливки, машина имеет гидроцилиндр 7 наклона ковшей на позиции заполнения расплавом из миксера 1. С помощью гидроцилиндра 7 можно сливать остатки расплава из ковша в изложницу 8, расположенную под миксером 1. Машина оборудована устройством для автоматического прекращения заливки (отсечки струи) по сигналу электроконтактного датчика уровня, встроенного в заливаемый кокиль. Точность дозирования — 2—3% [135].

Машина работает в автоматическом режиме. При подходе кокиля на позицию заливки ковш поворачивается и металл поступает в форму. По достижении уровнем металла контактного датчика подается команда на реверс ковша. Производительность машины до 200 заливок в час при дозе 4—5 кг.

В СССР разработана гамма аналогичных установок с ковшами емкостью от 250 до 2500 кг чугуна (три типа-размера).

Заливочные установки с пневматической выдачей металла. Установки этого типа получили довольно широкое распространение при заливке кокилей алюминием. Схема пневматических дозаторов серии Д показана на рис. 182. Они представляют собой герметичную камерную электропечь сопротивления 1, оборудованную крышкой 4 и люком 3 для долива металла.

Имеется обогреваемый металловод 5, выполняемый из асботермосиликатной трубы с калиброванной втулкой 6. После герметизации камеры по команде с пульта в пространство над металлом подается сжатый воздух. Металл поднимается по металловоду и достигает уровня калиброванного отверстия. В этой зоне установлен датчик, который подает сигнал на начало дозирования, осуществляемого по времени.

Главным достоинством установок является отсутствие металлических подвижных частей, ковшей, соприкасающихся с жидким алюминием, а также сифонная выдача сплава. Однако эти дозаторы имеют и ряд недостатков: низкую точность дозирования (особенно для малых доз), большую инерционность (большую продолжительность набора и сброса давления), необходимость останова установки для пополнения металлом, большое зеркало расплава и недолговечность металловода.

Существенное влияние на точность дозирования оказывают

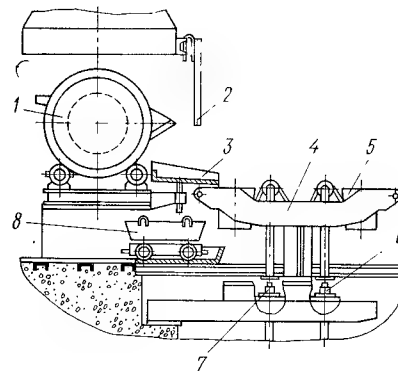


Рис. 181. Ковшовая заливочная машина в комплекте с газовым миксером:

1 — миксер; 2 — ограждение; 3 — лоток; 4 — поворотная рама; 5 — ковш; 6 — гидроцилиндр поворота ковша; 7 — гидроцилиндр для механизации слива остатков металла; 8 — изложница

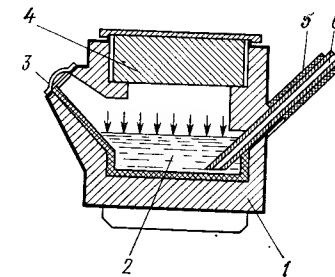


Рис. 182. Схема пневматического дозатора для заливки алюминиевых сплавов:

1 — электропечь сопротивления; 2 — ванна с жидким металлом; 3 — люк для долива металла; 4 — крышка печи; 5 — металловод; 6 — калиброванная втулка

скорость сброса давления воздуха и точность работы реле времени [102]. Путем модернизации электро- и пневматических схем дозаторов Д63 удалось повысить точность дозирования с $\pm 14-15\%$ до $\pm 5\%$.

Технические данные пневмодозаторов типа Д

Параметры	Д63	Д250	Д630
Емкость ванны по алюминию, кг	63	250	630
Масса дозы, кг:			
наименьшая	0,2	1,0	5
наибольшая	2,0	20	50
Продолжительность выдачи дозы (минимальной и максимальной), с . . .	4—5	7—20	7—25
Точность дозирования, %	± 5	± 5	± 5
Время разогрева печи, ч	8	6	6
Установленная мощность, кВт	11,6	21,6	34,0
Средний расход сжатого воздуха на один цикл, м ³	0,3	0,5	1,0
Габаритные размеры, мм:			
длина	2030	2650	3580
ширина	1505	1400	1900
высота	1285	1900	2250
Масса с футеровкой, кг	2000	2800	4000

Для заливки чугуна созданы пневматические дозаторы с индукционным подогревом: отечественные установки мод. У42 (НИИСЛ), ИЧКР-2,5 и ИЧКР-6 (Саратовский завод электротермического оборудования) и установки зарубежных фирм Asea, Jupker и др. Установки (рис. 183) представляют собой каналную индукционную печь, в которой ванна 1 и окно скачивания шлака герметизированы и рассчитаны для работы при избыточном давлении в полости печи [43]. Заливочный 2 и выпускной 3 каналы находятся

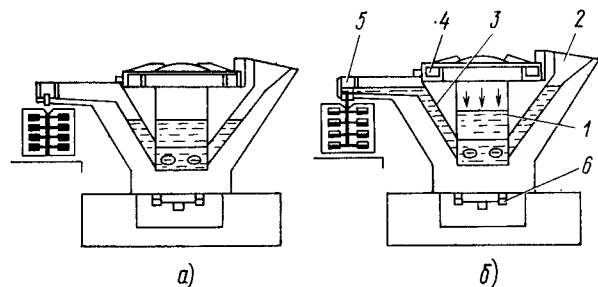


Рис. 183. Схема пневматического дозатора для заливки чугуна:

а — в исходном положении; б — в процессе выдачи дозы металла: 1 — ванна печи; 2 — канал для заливки металла; 3 — канал для выдачи металла; 4 — крышка; 5 — носок с калиброванной втулкой; 6 — канал индуктора

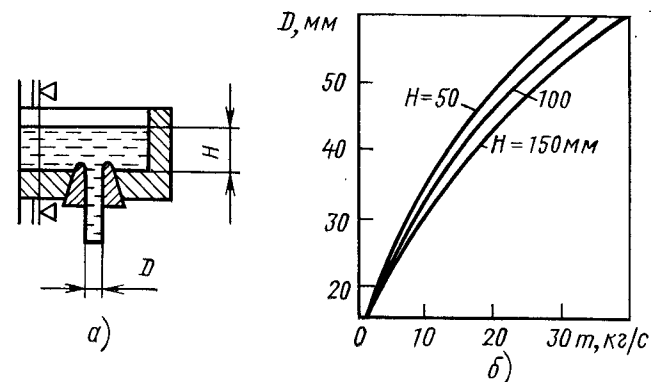


Рис. 184. Схема сливного носка пневматического дозатора (а) и кривые зависимости расхода металла от диаметра сливной втулки (б)

у дна печи, таким образом создается сифон, обеспечивающий наилучшие условия для выдачи чистого от шлаковых включений металла.

Использование сифонной системы позволяет без нарушения герметичности доливать металл в процессе работы установки, даже во время выдачи дозы. Для поддержания требуемой температуры жидкого металла в дозаторах этого типа, как правило, установлены каналные индукторы промышленной частоты. Дозирование металла производится по времени или по уровню металла над сливным отверстием и сменой сливных втулок с калиброванным отверстием (рис. 184, а). На рис. 184, б показана зависимость расхода жидкого металла от диаметра D сливного отверстия при разном напоре H жидкого металла. Для поддержания постоянного напора на желобе установки снабжаются электроконтактными датчиками.

Недостатки пневмоустановок для чугуна: возможность окисления жидкого металла при контакте со сжатым воздухом, сложность их герметизации, большая инерционность (особенно велико время после поступления команды до полного прекращения заливки), сложность эксплуатации каналных индукторов.

Для повышения быстродействия установок, особенно для выдачи мелких доз, целесообразно применять на желобе стопорный механизм, перекрывающий отверстие в сливной втулке.

Заливочные установки с применением электромагнитных сил. Относительная сложность герметизации, затрудненные условия съема шлака с поверхности ванны, повышенное окисление жидкого металла при контакте со сжатым воздухом — недостатки, которые характерны для установок с пневмовыдачей расплава. Отмеченных

Техническая характеристика установок

Параметры	У-42	ИЧКР-2,5	ИЧКР-6
Масса заливаемого металла, кг	30—200	30—200	30—400
Скорость заливки, кг/с	2—35	2—35	2—35
Полезная емкость ванны, т	2	2,5	6,0
Максимальная температура расплава в ванне, °С	1500	1500	1500
Рабочая температура, °С	1450	1450	1450
Мощность индуктора, кВт	200	160	200
Время перегрева металла на 100°С, ч	0,7	1,5	2,2
Максимальная производительность, т/ч:			
на режиме поддержания температуры	10—12	10—12	до 20
на режиме перегрева	4,3	3,5	3,7
Рабочее давление в сети сжатого воздуха, МПа	0,4—0,5	0,4—0,5	0,4—0,5

недостатков нет у так называемых магнитогидродинамических (МГД) установок. Силовое воздействие на жидкий металл в них основано на взаимодействии электрического тока в металле и внешнего электромагнитного поля. В зависимости от способа создания в металле электрического тока установки делятся на кондуктивные, в которых используется электропроводимость металла, и индуктивные.

Шлак и неметаллические включения, содержащиеся в жидком металле, имеют низкую электропроводность, поэтому в них не возникают вихревые токи. В результате эти частицы не движутся вдоль канала, а скапливаются в его начале. Таким образом из канала или желоба выходит чистый (без шлака) металл.

Скорость движения металла в канале обычно находится в пределах 0,3—1,8 м/с. Можно обеспечить и более высокую скорость, но при этом возникает сильная эрозия огнеупорной футеровки канала.

Индукционные насосы первоначально применяли для заливки и транспортировки алюминиевых сплавов. В настоящее время уже во многих отечественных и зарубежных цехах, выпускающих алюминиевое литье, применяют индукционные насосы подачи от 0,9 до 3 кг/с. В последнее время на основе опыта эксплуатации дозаторов для алюминия при использовании более термостойких и эрозионностойких футеровочных материалов и бетонов наметилась тенденция применения индукционных насосов в заливочных установках для чугуна и медных сплавов [115].

Институтом проблем литья АН УССР создана установка (мод. МДН-6) для электромагнитной дозированной заливки кокилей алюминиевыми сплавами,

Рис. 185. Магнитодинамическая заливочная установка:

1 — миксер; 2 — рама; 3 — электромагнит; 4 — металловод; 5 — носок; 6 — крышка; 7 — каналный индуктор; 8 — канал индуктора; 9 — магнитопровод

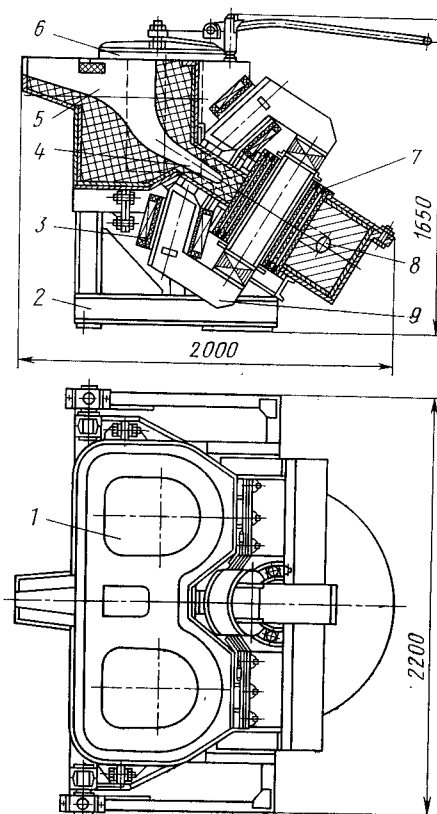
Основные данные установки: масса заливаемого металла (алюминия) 0,5—50 кг; емкость тигля (по алюминию) 150 кг; массовая скорость заливки (по алюминию) 0,3—3 кг/с; потребляемая мощность при выдержке металла 15 кВт, при заливке металла 25 кВт; габаритные размеры (без металлопровода) 1,7×0,66×1,45 м.

Этим институтом создана также и испытана магнитодинамическая установка мод. МДН-12 для подогрева и разлива чугуна [93]. Установка (рис. 185) представляет собою ванну-миксер 1 емкостью около 1000 кг с индукционным подогревом с помощью каналного индуктора 7 мощностью 100 кВт, работающего при напряжении 380 В и частоте тока 50 Гц.

Ванна имеет сверху два окна для съема шлака, закрываемых крышками 6. В средней части суженная часть миксера служит металловодом 4. В этой части толщина футеровки значительно уменьшена и с двух сторон (снизу и сверху) смонтированы две катушки 3 с магнитопроводом 9. Мощность этого электромагнита 50 кВт. Скорость перегрева металла в миксере составляет 100 град. в час.

Ванна футеруется огнеупорной набивной массой из высокоглинистого шамота. Электромагнитные силы создают избыточное давление в жидком металле до 0,3 кгс/см². Изменяя напряжение в катушках электромагнита с помощью автотрансформатора от 0 до 380 В, можно регулировать в широких пределах расход жидкого металла.

Магнитогидродинамический принцип подачи и дозирования расплава используется также при литье магниевых сплавов (М. Р. Цин, В. А. Самоник),



3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОКРАСКИ КОКИЛЕЙ

Нанесение покрытия на сажистой основе, в отличие от шамотной, легко поддается механизации. Механизация копчения кокиля ацетиленовым пламенем не вызывает трудностей. Однако применение ацетилена взрывоопасно.

Перед нанесением покрытия рабочую поверхность кокиля обдувают сжатым воздухом. Операция обдувки может быть совмещена с операцией нанесения покрытия. Ниже приводится описание устройств для механизации нанесения разовых покрытий на кокили и металлические стержни [42]. Устройства предназначены для нанесения краски состава 5 (см. табл. 23). Плотность краски 1,015—1,054 г/см³. Применяют устройства двух типов: с неподвижными и с перемещаемыми форсунками.

По методу распыления форсунки классифицируют на форсунки с распылением сжатым воздухом и без применения сжатого воздуха (механическое распыление), по методу подачи краски — под избыточным давлением и инъекцией.

На рис. 186 дана схема автоматического устройства для окраски кокилей корпусов электродвигателей (см. рис. 92). Краска от дозатора 15 подается по трубкам 16 непосредственно к емкости 5 и через полый шток цилиндра — к емкости 4. Крышка 3 кокиля и чаша 7 окрашиваются стационарными форсунками, а корпус 6 — подвижными, во время хода штока цилиндра вниз. Дозу краски

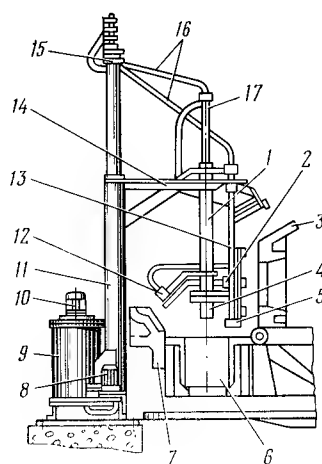


Рис. 186. Устройство для окраски кокилей: 1 — пневмоцилиндр; 2 и 12 — форсунки; 3 — крышка кокиля; 4, 5 — емкость для краски; 6 — корпус кокиля; 7 — литниковая чаша; 8 — насос; 9 — бак; 10 — мешалка с приводом; 11 — стойка; 13 — кронштейн; 14 — консоль; 15 — дозатор для краски; 16 — трубки; 17 — полый шток

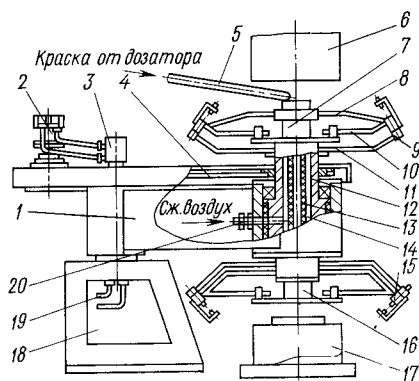


Рис. 187. Устройство для окраски металлических стержней:

1 — корпус; 2 — гидродвигатель; 3 — коллектор; 4 — передача ремня; 5, 8 и 13 — трубки; 6 — верхний металлический стержень; 7 и 16 — промежуточные дозаторы; 9 и 15 — форсунки; 10, 11 — кронштейны; 12 — шпиндель; 14 — полость для подачи сжатого воздуха; 17 — нижний стержень; 18 — стойка; 19 — трубка для краски; 20 — трубка для воздуха

регулируют настройкой дозатора. При необходимости во время ремонта и съема кокиля устройство поворачивают на консоли 14 вокруг стойки 11.

Устройство для окраски цилиндрических металлических стержней изображено на рис. 187. Форсунки 9 служат для окраски верхнего металлического стержня 6. В нижней части шпинделя на кронштейнах закреплены форсунки 15 для окраски нижнего стержня 17. Сжатый воздух для распыления краски подается по трубке 20 в полость 14 шпинделя.

4. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОТБИВКИ ЛИТНИКОВ, СЪЕМА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ОТЛИВОК

На отливках из цветных сплавов литники удаляют на механических ленточных или дисковых пилах, на чугунных отливках литники отбиваются при падении отливки из кокиля и при транспортировке. Толстые литники обрезают на станках. В массовом производстве целесообразно организовать отбивку литников по ходу технологического процесса. В горячем состоянии усилие отбивки значительно меньше, чем в холодном.

Устройства для отбивки литников применяют в составе автоматических линий кокильного литья чугунных деталей. Различают два типа устройств для отбивки литников: ударного и ломающего действия. На рис. 188 показано устройство для отбивки литника 2

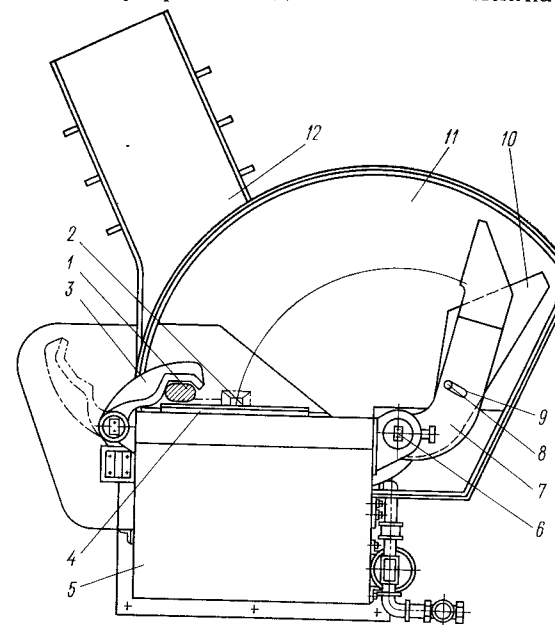


Рис. 188. Устройство для отбивки литников: 1 — отливка; 2 — литник; 3 — захват; 4 — плита; 5 — корпус; 6 — торсионный вал; 7 — ударник; 8 — ось; 9 — паз; 10 — маховой рычаг; 11 — кожух; 12 — склиз

от отливки (стойка тракторного плуга) 1. Отливка прижимается захватом 3 к плите 4, установленной на корпусе 5. Ударник 7 может поворачиваться относительно торсионного вала 6 с помощью рычага и штока пневмоцилиндра. Для увеличения махового момента ударник 7 с помощью оси 8 через паз 9 связан с маховым рычагом 10. Зона действия ударного механизма ограждена кожухом 11; отбитые литники и отливка падают на транспортер по склизу 12. Для создания удара значительной силы сжатый воздух подается в пневмоцилиндр по короткому патрубку большого диаметра, который связан с ресивером, соединенным с пневмоцилиндром через клапан большого сечения. Так как рассматриваемое устройство работает периодически, то в промежутки времени между ударами ресивер успевает заполниться сжатым воздухом и давление в нем поднимается до рабочего. Описанное устройство входит в состав автоматизированной линии мод. А35 (см. с. 358).

Механизмы извлечения отливок из кокиля должны обеспечить передачу отливок в ориентированном положении на последующую операцию; исключить удары и деформацию при сбросе отливок. Первое требование относится к устройствам, предназначенным для автоматизированных линий.

В автоматизированных линиях с кокилями, имеющими вертикальный разъем, устройства для съема отливок выполнены в виде манипуляторов пантографного типа. Привод основного движения — гидравлический, привод захвата — пневматический. В машинах с горизонтальной плоскостью разъема съемник выполнен в виде лопаты, на которую выталкивается отливка из верхней половины кокиля.

При выталкивании отливок из кокилей с вертикальной плоскостью разъема последние падают вниз на транспортер или в короб. Для предотвращения возможного деформирования горячей отливки последние направляются по системе склизов с минимальной высотой падения. Горячие отливки транспортируются траковыми транспортерами, либо в коробах с помощью кранов или погрузчиков.

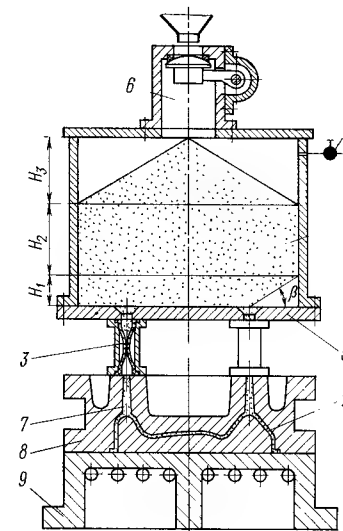
5. ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ В ОБЛИЦОВАННЫЕ КОКИЛИ

Пескодувные головки. Как уже указывалось (см. параграф 6, гл. VI), промышленное применение получили автоматизированные и комплексно-механизированные линии литья в кокили, облицованные сыпучей сухой термотвердеющей песчано-смоляной смесью. Рассматриваемые ниже вопросы механизации относятся к указанным кокилям.

Установлено, что оптимальная скорость потока сыпучей сухой смеси и, следовательно, плотность облицовки достигаются при

Рис. 189. Схема пескодувного резервуара с постоянным давлением сжатого воздуха:

1 — пескодувный резервуар; 2 — зазор между моделью и кокилем; 3 — пескодувные сопла; 4 — клапан; 5 — вдувная плита; 6 — шлюз; 7 — вдувные отверстия; 8 — кокиль; 9 — модельная плита



давлении вдува 0,3—0,35 МПа (3—3,5 кгс/см²) [91]. Однако обычный пескодувный процесс не удовлетворяет этому условию, так как при таком процессе вначале вдува давление в резервуаре со смесью равно всего 0,08 МПа (0,8 кгс/см²) и только через 0,15 с достигает 0,2—0,3 МПа (2—3 кгс/см²) [120]. Тонкая облицовка требует незначительного количества смеси, а вдувные отверстия рационально размещать, как указывалось в гл. VIII, с шагом в среднем от 0,15 до 0,25 м, в зависимости от конфигурации модели [121]. В этих условиях зазор между моделью и кокилем заполняется смесью при неустановившемся давлении в пескодувной головке 0,08—0,2 МПа.

В связи с изложенным, предложен способ получения тонких оболочек из сухих термореактивных смесей с помощью пескодувных головок, работающих при постоянном давлении в резервуаре [91]. Пескодувный резервуар 1 (рис. 189) отличается наличием на вдувной плите 5 управляемых пескодувных сопел 3. До вдува сопла закрыты. Через шлюзный клапан 6 загружается смесь. Затем через клапан 4 подается сжатый воздух. После прижатия кокиля 8 к соплам 3 последние открываются, и смесь под давлением поступает в отверстия 7 кокиля и заполняет зазор 2 между кокилем и моделью. Резервуары, работающие при постоянном давлении, отличаются от обычных пескодувных головок, в основном, расположением запирающих устройств. У обычных пескодувных головок эти устройства в виде клапанов большого сечения расположены на входе сжатого воздуха в резервуар. В начальный период здесь всегда снижается давление воздуха, подаваемого в резервуар (вследствие расширения воздуха в резервуаре). Поэтому начальный период истечения смеси из этих головок проходит, как указывалось, при низком давлении, а смесь имеет относительно невысокую скорость.

Резервуар 1 (рис. 189) постоянно соединен с магистралью сжатого воздуха; емкость его значительно превосходит объем кокиля, заполняемый смесью, поэтому как в начальный, так и в последующий период вдува смеси давление и скорость потока практически не меняются. Истечение смеси (и воздуха) из сопел

в начальной стадии вдува всегда происходит в надкритической области (рабочее давление в резервуаре значительно превышает давление в зазоре кокиля). В период открытия затвора сопла сначала происходит истечение только воздуха, затем проскальзывают отдельные песчинки и только после образования проходного сечения, соизмеримого с размерами зерен песка, начинается интенсивное истечение смеси [121].

При засыпке смеси в пескодувный резервуар образуется конус (рис. 189) высотой H_3 с вершиной, достигающей до нижнего уровня загрузочного устройства. По мере использования смеси в резервуаре появляются конусы-воронки с вершинами, направленными к соплам. Для предотвращения прорыва воздуха в кокиль над соплами должен оставаться минимальный слой смеси H_1 . При работе с одним соплом допустимая высота слоя смеси

$$H_1 = \sqrt[3]{\frac{3V_n}{\pi \operatorname{ctg}^2 \beta}},$$

где V_n — объем смеси, вдуваемой соплом; β — угол естественного откоса смеси ($30-35^\circ$).

Установлено [121], что при высоте слоя сухой плакированной смеси в резервуаре от 120 до 320 мм (перепад высот $H_2 = 200$ мм) расход смеси через сопла колеблется незначительно. При давлении вдува $0,3$ МПа (3 кгс/см²) и проходном сечении сопла 16 мм расход смеси через любое сопло равен $1,43 \pm 0,004$ кг/с, т. е. все сопла практически находятся в одинаковых условиях.

Смесь, находящаяся в углах прямоугольных головок, и в углах, образованных вдувной плитой и корпусом, не используется, залеживается и комкуется. Уплотняется и комкуется верхний слой смеси, соприкасающийся со сжатым воздухом. Рекомендуется выполнять пескодувные резервуары, работающие под постоянным давлением, цилиндрической формы, а верхнюю часть делать в виде усеченного конуса или сферической.

На рис. 190 показан рыхлитель круглой пескодувной головки со сферическим верхом. В центральной части корпуса 1 проходит полый вал, приводящийся во вращение гидроцилиндром 7 . К нижней части вала крепится решетчатая рамка 3 , снабженная зубьями 2 . При возвратно-поворотном вращении вала с рамкой зубья рыхлят смесь. Контроль верхнего и нижнего допустимых уровней смеси осуществляется указателями 5 . Смесь подается через клапанный шлюз 6 и, далее, через отверстие в полой валу рыхлителя поступает в резервуар. Окна 8 служат для периодического осмотра и очистки внутренней полости резервуара.

Подача смеси в пескодувную головку должна осуществляться без сброса давления в ней. Для этой цели применяют специальные шлюзовые устройства (рис. 191).

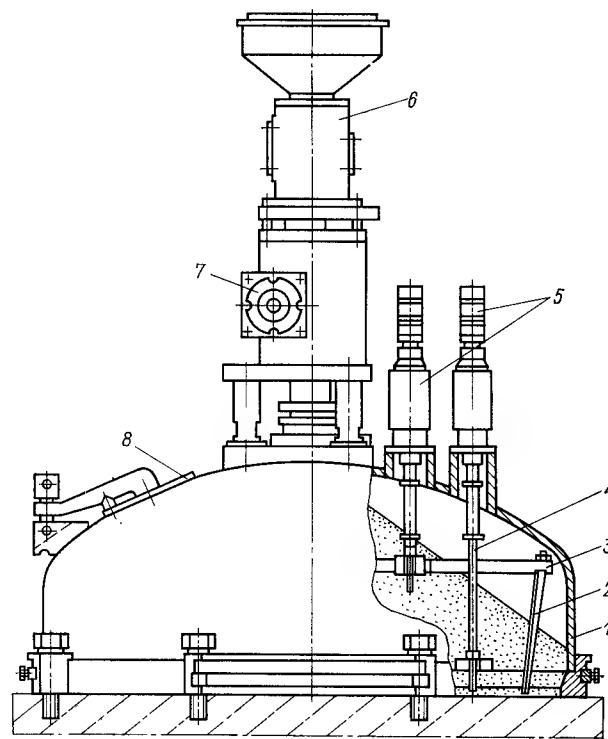


Рис. 190. Пескодувная головка с рыхлителем:

1 — корпус; 2 — зубья; 3 — рамка; 4 — шток датчика; 5 — указатель уровня смеси; 6 — шлюз; 7 — гидроцилиндр поворота рыхлителя; 8 — окно

Фирма А. Hottinger (ФРГ) для вдува смеси выпускает специальные небольшие пескодувные головки, причем число головок равно максимальному числу вдувных отверстий в оснастке. Головка (рис. 192) состоит из вертикального корпуса 1 в виде цилиндра диаметром $150-200$ мм, в котором имеются две перегородки 2 и 11 и патрубок 9 с клапаном 10 для подвода сжатого воздуха давлением $0,3-0,4$ МПа ($3-4$ кгс/см²). По оси корпуса проходит шток 4 с двумя резиновыми клапанами 3 и 5 . Шток выполнен в виде трубы, перемещающейся пневмоцилиндром.

В исходном положении нижний клапан 5 закрыт, а верхний 3 открыт, полость головки соединена с атмосферой; из верхнего бункера смесь засыпается в головку. После прижима кокиля 8 к насадке 6 шток 4 поднимается, клапан 3 закрывается, через клапан 10 в головку подается сжатый воздух, производится вдув смеси. По истечении $2-3$ с включается подача сжатого воздуха

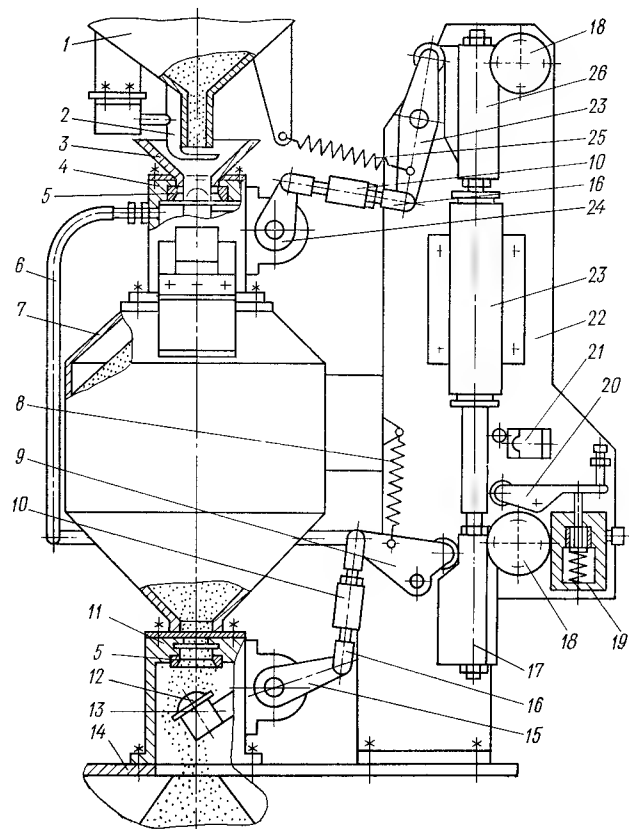


Рис. 191. Шлюзовое устройство для подачи смеси в пескодувную головку:

1 — бункер; 2 — заслонка; 3 — затвор; 4 — верхний клапан; 5 — резиновое кольцо; 6 — труба к клапану; 7 — промежуточный бункер; 8 и 25 — пружины; 9 и 12 — рычаги с роликами; 10 и 16 — тяги; 11 — нижний клапан; 13, 15, 20, 24 — рычаги; 14 — пескодувная головка; 17 и 26 — копиры; 18 — опорный ролик; 19 — клапан для воздуха; 21 — датчик; 22 — плита; 23 — гидроцилиндр

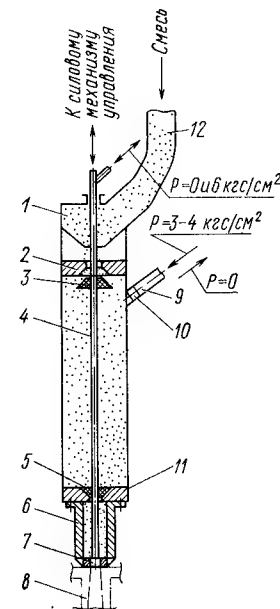
давлением 0,6 МПа (6 кгс/см²) в трубку штока 4. Смесь из насадки и частично из вдувного отверстия в кокиле увлекается вверх и выдувается в головку. Пространство под нижним клапаном освобождается от песка. Продувка длится 1—2 с. После этого клапан 10 сообщает головку с атмосферой; шток идет вниз, нижний клапан закрывается, а верхний открывается. Начинается загрузка головки смесью.

Как видно из описания, система управления головки сложна, а если учесть, что на машине устанавливается от четырех до восьми пескодувных головок, то ясно, насколько сложна вся система вдува.

Рис. 192. Пескодувная головка фирмы «А. Hottinger»: 1 — корпус; 2 и 11 — перегородки; 3, 5 и 10 — клапаны; 4 — шток; 6 — насадка; 7 — вдувное отверстие; 8 — кокиль; 9 — патрубок; 12 — труба для смеси

Пескодувные сопла. В НИИСЛе создано и испытано несколько конструкций сопел. Промышленное применение нашли две конструктивные группы: с механическим и пневматическим управлением (рис. 193).

На рис. 193, а представлено механическое сопло нормально закрытого исполнения. Проходное сечение открывается при прижатии к соплу кокиля с моделью. В корпусе 3 размещен резиновый клапан 8 со штоком 7, закрепленным на перемычке подвижной втулки 4. Снизу к втулке приклеено уплотнение 9, служащее для плотного соединения сопла с вдувным каналом в кокиле. При опускании кокиля резиновая втулка 6 с пружиной 5 возвращают клапан в исходное положение. Пружина препятствует радиальной деформации втулки при воздействии давления. Сопло крепится к вдувной плите 2 через патрубок 1. Отверстия 10 в уплотнении служат для сообщения полости сопла с атмосферой перед отходом кокиля от торца сопла. Таким путем предотвращается выброс смеси из вдувных отверстий кокиля. Смесь начинает поступать в форму при перемещении клапана на 1 мм. При ходе 6 мм клапан полностью открывается. При скорости прижима формы 100 мм/с сопло полностью открывается за 0,08 с. Это и есть время неустановившегося режима его работы. Количество смеси, просыпающейся из сопла после отхода формы, составляет 40 г. [122].



Техническая характеристика сопла: производительность при давлении 3 кгс/см² — 1,4 кг/с; ход клапана 6 мм; суммарная деформация полностью открытого сопла 8 мм; усилие открытия 280—300 кгс; минимальное расстояние между соседними соплами 70 мм.

Основные недостатки механических сопел: наличие остатков смеси над вдувными отверстиями формы, значительное усилие открывания сопла; необходимость скрепления кокиля с моделью или сброса давления воздуха из резервуара после вдува. При вдуве облицовки в полости между кокилем и моделью устанавливается давление 0,15—0,20 МПа (1,5—2 кгс/см²), при давлении в пескодувном резервуаре — 0,3 МПа. Потеря давления связана с фильтрацией воздуха через смесь, которая находится между

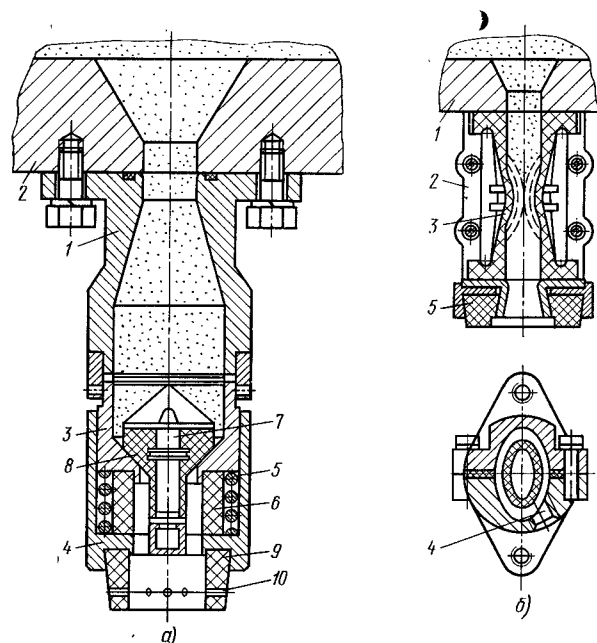


Рис. 193. Пескодующие управляемые сопла:

а — с механическим управлением: 1 — патрубок; 2 — вдувная плита; 3 — корпус; 4 — втулка; 5 — пружина; 6 — резиновая втулка; 7 — шток; 8 — клапан; 9 — уплотнение; 10 — отверстия; б — с пневматическим управлением: 1 — вдувная плита; 2 — разъемный корпус; 3 — втулка-клапан; 4 — отверстие управления; 5 — уплотнение

моделью и кокилем. Из-за остаточного давления воздуха в поровом пространстве облицовки возникает значительная сила, отрывающая кокиль от модели. Так, для кокиля размером $1000 \times 1000 \times 200/200$ мм эта сила достигает 150 кН, что значительно больше силы тяжести кокиля. При отрыве кокиля от модели происходит выдув облицовочной смеси.

Для предотвращения указанного явления вдувные плиты с механическими соплами снабжают пружинным устройством, которое в исходном положении выступает над уровнем сопел. При подходе к соплам кокиль сжимает пружины. Сила сжатых пружин удерживает кокиль на модели в момент его отрыва от сопел. Усилие пружина регулируется винтами.

У пневматического сопла (А. с. № 248907) нет таких недостатков. Втулка-клапан 3 (рис. 193, б) в средней части имеет чечевицеобразное сечение. При подаче сжатого воздуха в систему управления 4 происходит пережим канала в указанном сечении и прекращается подача смеси.

Исследованиями [121, 122] установлено, что при давлении в резервуаре 0,3 МПа (3 кгс/см²) давление в магистрали управления

должно быть 0,6 МПа. Истечение воздуха через сопло начинается через 0,009—0,004 с после сброса давления в системе управления, а истечение смеси соответственно через 0,027—0,021 с. Таким образом, продолжительность неустановившегося режима работы пневматического сопла составляет всего 0,018 с, что примерно в 4 раза меньше, чем у механического. При истечении из каждого сопла в процессе нанесения облицовки на кокиль 0,5 кг смеси сопло практически работает в установившемся режиме. Расход смеси через пневматическое сопло при диаметре резиновой втулки 25 мм и давлении в резервуаре 0,3 МПа составляет 3,6 кг/с.

Для устранения просыпи смеси из пневматических сопел во втулке, крепящей уплотнение 5, предусмотрено отверстие, ниже сечения пережима, которое соединяется через электромагнитный клапан с магистралью управления. Перед пережимом втулки-клапана сжатый воздух подается сначала в магистраль продувки. Сжатый воздух более высокого давления увлекает смесь из сопла и выдувает ее вверх, в резервуар. После этого сжатый воздух подается в магистраль управления на пережим втулки-клапана, одновременно магистраль продувки соединяется с атмосферой. При этом сжатый воздух из вдувных отверстий кокиля и из облицовки выходит в атмосферу. Этим устраняется отрыв кокиля от модели в момент его отвода от сопел.

Недостатки пневматических сопел заключаются в том, что они являются нормально открытыми, т. е. в нерабочем состоянии следует закрывать магистраль управления и держать клапаны пережатыми, либо снабжать сопла дополнительными устройствами, предотвращающими самопроизвольное просыпание смеси (разрезная резиновая шайба, механический пружинный клапан, либо лабиринтное уплотнение, как это рекомендуется в работе [160]). Вдувные плиты с пневматическими соплами имеют довольно сложные пневмокоммуникации и систему управления.

Машины для нанесения облицовки. Известен ряд конструкций машин для нанесения облицовки на кокили.

На рис. 194 представлена карусельная установка (пат. США № 3.077.014), в состав которой входит машина для нанесения облицовки на кокиль с вертикальным разъемом.

Эксплуатация машины начинается с осмотра и очистки модели 5 и кокиля 6. После этого модель опускается и кокили смыкаются. Пескодующая головка 2 подводится к зазору между моделью и кокилем, прижимается к собранной оснастке и производится вдув облицованной смеси. Через некоторое время оснастку разбирают и извлекают модель. Затем проставляются стержни, кокили смыкаются и форма заливается металлом. По окончании формирования отливки форма разбирается. Очищают кокиль вручную. Нагрев кокиля и модели осуществляется газом.

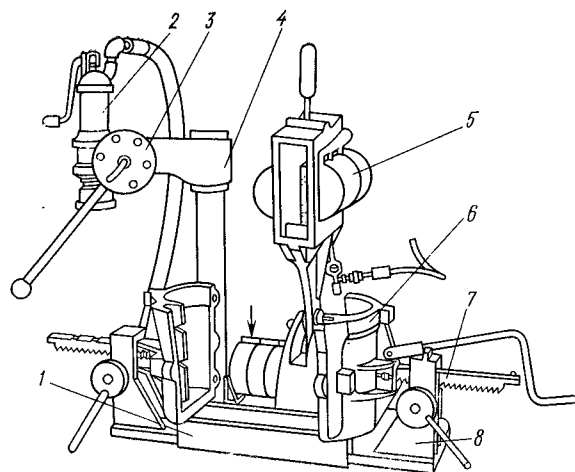


Рис. 194. Машина для нанесения облицовки на кокиль с вертикальной плоскостью разреза:
1 — станина; 2 — пескодувная головка; 3 — механизм прижима; 4 — консоль; 5 — модель; 6 — кокиль; 7 — механизм перемещения кокиля; 8 — стойка

Другой тип машин, предназначенный для нанесения облицовки на неразъемные (вытряхные) кокили, показан на рис. 195. Машина двухпозиционная (А. с. № 373080). На основании 1 смонтирован механизм 2 подъема и протяжки и стойка 3 с пескодувной головкой 10. Пескодувная головка закреплена на поворотной консоли 12 и поочередно устанавливается на оси одного либо другого кокиля. На верхних крышках цилиндров механизма 2 закреплены рамки 5 с направляющими 7 и верхними рамками 8, на которых установлены кокили 9. Модели 6 находятся на подъемных столах 4. После загрузки пескодувного резервуара смесью, его герметизации и подачи сжатого воздуха поочередно осуществляется подъем столов 4. При этом сначала модели входят в гнезда кокиля, затем уже совместно прижимаются к вдувной плите. Производится вдув смеси. Затем кокиль несколько опускается; по истечении времени отверждения стол идет до упора, модели извлекаются из кокиля.

Фирма А. Hottinger разработала два типа карусельных машин для нанесения облицовки на кокили: МКА 822 и МКА 200С. Первая — восьмипозиционная, вторая — двухпозиционная. Ма-

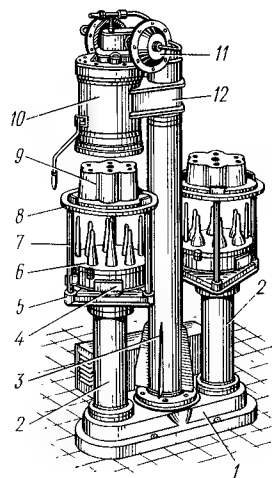


Рис. 195. Машина для нанесения облицовки на вытряхные кокили:

1 — основание; 2 — механизм подъема; 3 — стойка; 4 — стол; 5 и 8 — рамки; 6 — модели; 7 — направляющие; 9 — кокиль; 10 — пескодувная головка; 11 — клапан; 12 — консоль

шина МКА 822 выпускается трех типо-размеров: для модельных плит 440×300 , 660×440 и 850×700 мм. Нагрев осуществляется газом. Продолжительность цикла соответственно 25—30; 30—40 и 40—50 с. Машина работает следующим образом. На первой позиции происходит вдув смеси. Далее модельная плита с кокилем, пройдя промежуточную позицию, подается в газовую секторную печь, где на трех позициях нагревается. Газовые горелки стоят снизу и сбоку. На следующей позиции (шестой) заканчивается отверждение облицовки на воздухе, а на седьмой позиции — модель извлекается. На последней (восьмой) позиции осматривают и очищают модели.

Автоматизированные и комплексно-механизированные линии. В СССР автоматизированные линии разработаны в НИИСЛе совместно с СКБТЛ. Они выпускаются Тираспольским заводом литейных машин им. С. М. Кирова.

Линии (рис. 196) представляют собой замкнутый прямоугольник, состоящий из двух продольных и двух поперечных ветвей. Линии включают отдельные, имеющие самостоятельное управление участки, на которых выполняются различные технологические операции. Механизмы и агрегаты участков связаны между собой приводными рольгангами с фрикционными роликами, обеспечивающими работу участков линии в заданном ритме. «Команды» на работу механизмов участка подаются пришедшими на рабочие позиции кокилями. Линии мод. А75, А83, А82 по существу являются модификациями одной линии и отличаются друг от друга расположением гидрооборудования.

Линия мод. А87 отличается от линий мод. А75, А82 и А83 расположением заливочного участка на торцовом рольганге, а также наличием механизмов для кантовки кокилей на 90° и скрепления их перед заливкой. Линии мод. А82М и А120 снабжены встроенным термостатом для нагрева кокилей. Линия А96 отличается от последних тем, что в ее состав входит вдвойне пескодувная машина челночного типа, а нагрев кокилей и стабилизация их термического цикла осуществляются в газовых проходных печах.

Каждая из линий включает следующие участки: нанесения облицовки, сборки кокилей, заливки, разборки форм, выбивки отливок и очистки кокилей, охлаждения кокилей, кантовки кокилей. На всех линиях, кроме А96, применены аналогичные по конструкции пескодувные агрегаты, подъемники, манипуляторы, гидрооборудование, фрикционные рольганги и т. д. Вследствие агрегатирования конструкций манипуляторов эти механизмы собираются из унифицированных узлов. Учитывая идентичность конструктивной схемы линий, в качестве примера рассмотрим работу только линии мод. А82М.

Нанесение облицовки на кокили производится на четырехпозиционном пескодувно-карусельном агрегате 1. Кокиль с агрегата

Техническая характеристика линий

Параметры	A 82 A 83 A 75	A 82M	A 120	A 87 *	A 96
Габаритные размеры кокиля (длина×ши- рина×высота), мм	1000×1000× ×200/200	1000×1000× ×200/200	1000×1000× ×250/250	1300×700× ×250/250	1400×1200× ×250/250
Металлоемкость фор- мы (максимальная), кг	100	150	200	200	300
Производительность при максимальной металлоемкости, тыс. т в год	12,0	17,0	21,0	29,0	55,0
Число на линии ком- плектов: кокилей	16	26	26	28	45
моделей	2	2	2	2	2
Число обслуживаю- щих рабочих	8	8	8	8	8
Габаритные размеры линии в плане, м	36,8×9,5	48	49,5×10	53×8,3	82×13
Мощность электро- нагрева моделей, кВт	140	140	140	140	400

* Формы имеют вертикальный разъем на участке заливки.

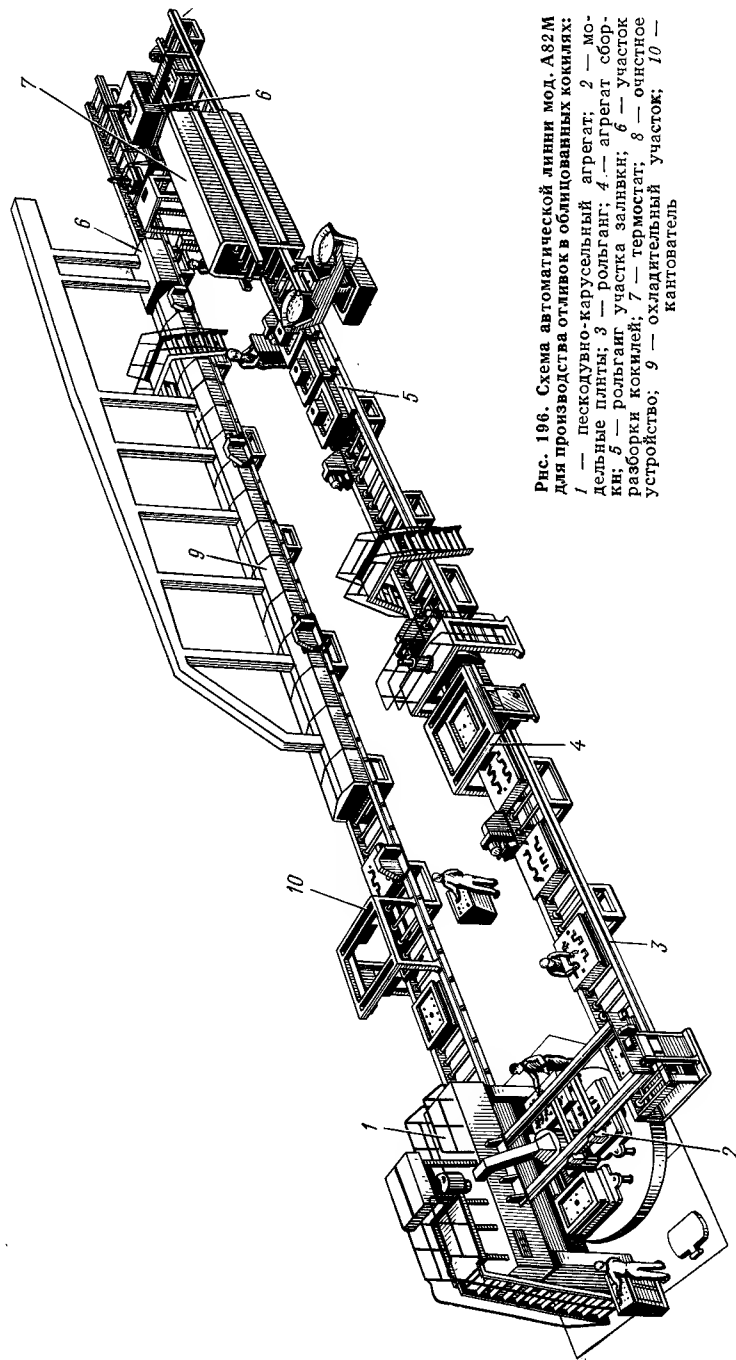


Рис. 196. Схема автоматической линии мод. А82М для производства отливок в облицованных кокилях: 1 — пескоструйно-карусельный агрегат; 2 — модельные плиты; 3 — роуланг; 4 — агрегат сборки разборки кокилей; 5 — участок заливки; 6 — участок разборки кокилей; 7 — термостат; 8 — очистное устройство; 9 — охлаждаемый участок; 10 — кантователь

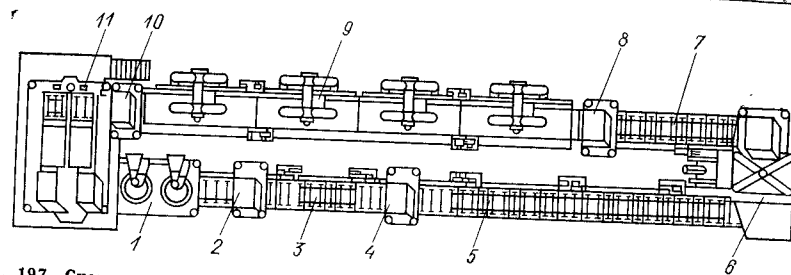


Рис. 197. Схема линии для производства в облицованных кокилях тонкостенных мелких отливок:

1 — пескодувная установка; 2 — кантователь; 3 и 7 — рольганги; 4 — сборщик; 5 — участок заливки; 6 — установка разборки и очистки; 8, 10 — кантователи; 9 — элект-

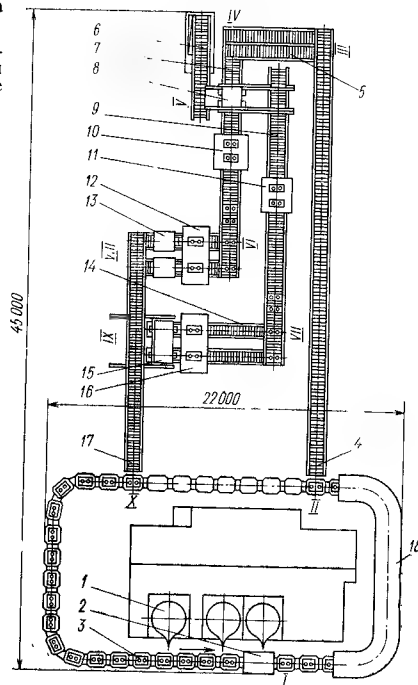
снимается манипулятором на рольганг 3 (рис. 196), где при необходимости в кокиль устанавливаются стержни. Далее кокиль передается рольгангом в агрегат сборки 4, а собранные формы останавливаются на рольганг 5 участка заливки. Здесь формы останавливаются с помощью специальных упоров и заливаются. Залитые формы подаются в термостат 7, который выполняет две функции: в нем производится охлаждение залитых форм, а в случае остановки линии — накопление собранных незалитых форм. Для этого термостат 7 выполнен двухъярусным. Залитые формы передаются на поперечный участок разборки 6. Здесь с помощью механическим путем производится очистка вдувных отверстий и плоскости разъема кокиля от облицовки. Очистка рабочего гнезда кокиля от сгоревшей облицовки производится сжатым воздухом в устройстве 8. На участке 9 кокиль охлаждается до заданной температуры и по рольгангам передается в кантователь 10 и далее манипулятором загружается в агрегат нанесения облицовки.

В СССР предложена (А. с. № 325094) специализированная линия литья в облицованные кокили мелких деталей (рис. 197). Верхняя и нижняя половины кокилей, нагретые в электропечи 9 до температуры 160—250° С, с помощью кромочного рольганга подаются одновременно в пескодувную установку 1 проходного типа, где производится спаривание кокилей с моделями (прикрепленными к подъемным столам машин), вдувание смеси в зазор между кокилем и моделями. Температура моделей 200—250° С поддерживается электронагревателями. По окончании отверждения модели извлекаются из половинок кокилей и передаются на установку 2 для кантовки. На рольганге 3 производятся осмотр форм и установка стержней в нижнюю половину.

В сборщике 4 выполняется сборка форм и собранный кокиль подается на участок заливки 5. Далее кокиль подается в установку 6 разборки форм и их очистки, где производится выталкивание

Рис. 198. Схема линии для производства тормозных барабанов и дисков (ФРГ):

1 — индукционная электропечь; 2 — заливочная машина; 3 — литейный конвейер; 4, 5, 7, 9, 14, 17 — роликовые конвейеры; 6 — конвейер для отливки; 8 — передающий манипулятор верхних кокилей; 10 и 11 — дробебетные камеры; 12 и 16 — пескодувные машины; 13 — кантователи; 15 — манипулятор; 18 — охлаждающий туннель



отливок, очистка кокиля от остатков облицовки и поочередная выдача нижней и верхней полуформы на обратную ветвь рольганга 7, откуда после контроля температуры они подаются на соответствующий ярус электропечи 9, где производится подогрев кокилей. После этого кокили устройством 11 передаются на новый цикл облицовки.

Техническая характеристика: производительность 20—40 форм/ч; габаритные размеры кокилей (длина×ширина×высота) 710×650×240/170 мм; масса кокиля — не более 1200 кг; габаритные размеры линии (без вспомогательного оборудования) 31×5,5×4,1 м.

На автомобильном заводе Volkswagen (ФРГ) эксплуатируются автоматизированные линии для производства тормозных барабанов и дисков [133, 180].

Линия (рис. 198) состоит из участка изготовления форм и заливочного конвейера. Верхние и нижние половины кокиля смонтированы в стальных рамках-обоймах со штырями и направляющими втулками. Заливочный участок состоит из непрерывно движущегося линейного конвейера 3 с тактом выдачи форм 15 с. Внутри конвейера установлены три индукционные печи 1 емкостью по 8 т каждая. Заливка металла производится с помощью передвижных заливочных машин 2 на поз. I. Залитые формы входят в охлаждающий туннель 18, а на поз. II сталкиваются на роликовый конвейер 4. На поз. III две формы одновременно сталкиваются на двоярный роликовый конвейер 5, а на поз. IV — на конвейер 7. На поз. V верхние кокили снимаются манипулятором и передаются (по два) на роликовый конвейер 9, а из нижних выталкиваются отливки, захватываются зажимами и попарно передаются на конвейер 6. После этого два нижних и два верхних кокиля поступают одновременно в очистные дробебетные камеры 10 и 11, в которых остатки облицовки удаляются с поверхности и из вдувных отверстий

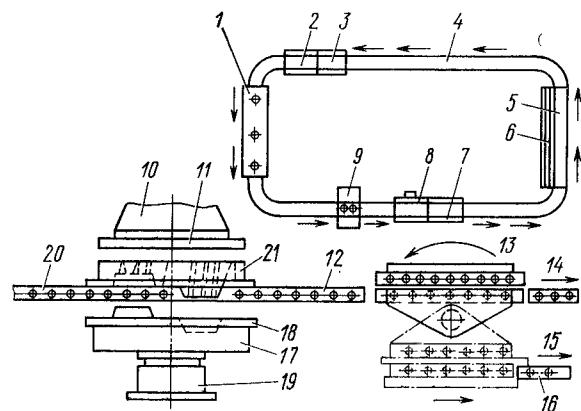


Рис. 199. Схема линии для производства тормозных барабанов (США):

1 — печь; 2 — кантователь; 3 — механизм разборки форм и выбивки отливок; 4 — участок охлаждения; 5 — заливочный конвейер; 6 — вентиляционный зонтик; 7 — сборщик форм; 8 и 13 — кантователи; 9 — пескодувная машина; 10 — пескодувная головка; 11 — вдувная плита; 12, 16, 20 — роликовые конвейеры; 14 — выход верхних кокилей; 15 — выход нижних кокилей; 17 — нагреватель; 18 — модель; 19 — прижимной стол; 21 — кокиль

кокилей дробью. На поз. VI и VII кокили, в случае падения температуры ниже 490—500 К (220—230° С), нагреваются газовыми горелками, после чего поступают в пескодувные машины 12 и 16, в которых они соединяются с моделями, после чего в зазоры между моделями и кокилями вдувается песчано-смоляная смесь. Отверждение облицовки происходит в течение 15—20 с при температуре кокилей 490—520 К, а моделей 570 К. Обогрев моделей производится маслом, нагреваемым до 610 К электронагревателями и непрерывно прогоняемым насосом через внутренние полости моделей.

После нанесения облицовки рамки с нижними кокилями кантуются на 180° кантователями 13 и передаются на роликовый конвейер 17. На поз. VIII в кокили устанавливаются стержни. Сборка форм производится на поз. IX манипулятором 15, после чего формы на поз. X сталкиваются на литейный конвейер 3.

На автозаводе фирмы «Toyota» (Япония) применяют линии для производства в облицованных кокилях блоков цилиндров. Линии созданы при участии фирмы «A. Hottinger» (ФРГ). Производительность линии — 60 форм в час. Облицовка на кокили наносится на четырехпозиционном карусельно-пескодувном агрегате. Отверждение облицовки производится на второй позиции карусели в газовой кольцевой печи. На третьей позиции кокиль снимается и подается на участок сборки и заливки. Четвертая позиция карусели служит для обслуживания и очистки модели. Перемещение форм осуществляется толкателями по неприводным рольгангам.

После охлаждения отливок формы разбираются. Отливки и остатки облицовки выбиваются на выбивных решетках, а кокили кантуются рабочими поверхностями вниз, после чего поступают в охлаждающий туннель, а затем снова в пескодувную установку.

В работе [160] описана линия для отливки в облицованных кокилях тормозных автомобильных барабанов (рис. 199). Кокили двухместные. Линия представляет замкнутый в плане прямоугольник, состоящий из нескольких секций приводных и неприводных роликовых конвейеров, соединяющих друг с другом основные функциональные агрегаты линии.

В той же работе приведена схема линии для отливки в облицованных кокилях тракторных и автомобильных деталей, а также водопроводных фитингов. Линия состоит из участка для изготовления форм и участка заливки. В состав первого участка входит двенадцатипозиционная пескодувно-карусельная установка с тремя рабочими позициями: загрузка, нанесение облицовки и съем облицованных кокилей. Между 4-й и 10-й позициями происходит отверждение облицовки в кольцевой печи, теплотой которой нагреваются также модели; 11-я и 12-я позиции служат для осмотра и очистки моделей. Облицованные кокили снимаются с моделей манипулятором, кантующим их на 180° рабочей поверхностью вверх, и по наклонному рольгангу направляются на участок стержней.

Сборка форм производится крановым манипулятором. После сборки формы переставляются вторым манипулятором на подвесной конвейер, где заливаются металлом. После охлаждения формы снимаются с подвесного конвейера на приводной рольганг, передающий их в агрегат разборки и выбивки отливок. Освобожденные от отливок кокили подаются рольгангом в газовую печь и затем поочередно сталкиваются на позицию загрузки карусельной установки. Рядом с линией расположены рольганг и печь для предварительного нагрева вновь вводимых в линию кокилей.

1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕХОВ

Эффективность применения литья в кокиль зависит от уровня разработки технологических процессов, степени автоматизации и производительности оборудования, стойкости оснастки. Однако достижение высоких технико-экономических показателей в такой же мере определяется организацией производства и уровнем проектных решений цехов и участков. Опыт показывает, что наилучшие технико-экономические показатели удается получить при создании специализированных цехов и участков, рассчитанных на выпуск не менее 5 тыс. т отливок в год (по чугуно). Наиболее ценный опыт накоплен в автомобильной, тракторной, электро-технической отраслях промышленности.

Несмотря на различие планировочных решений цехов, можно выделить ряд общих принципов их построения:

1) цехи включают плавильные и кокильно-заливочные участки, отделения обрубки и термообработки, стержневое, финишных операций; характерным является наличие участка ремонта кокилей;

2) производство строится на основе поточных и автоматизированных линий;

3) предусматриваются мощные вентиляционные установки, так как имеют место большие локальные тепловыделения;

4) новые цехи цветного литья располагаются, как правило, в двухэтажных зданиях;

5) оптимальная производительность специализированных цехов составляет 10—25 тыс. т в год.

В цехах серийного производства, в случае установки поточных линий из отдельных кокильных машин, на последних выполняются все операции технологического процесса изготовления отливки: подготовка полуформ, установка стержней, сборка форм, заливка металла, охлаждение отливки, разборка формы, извлечение отливки, охлаждение формы. Это требует организовать подачу металла, стержней, уборку отливок и т. п. к каждой машине, что, с одной стороны, создает определенные трудности в организации транспортных систем и потоков; с другой — усложняет решения по вентиляции, так как необходим подвод приточно-вытяжных патрубков и трубопроводов к каждой машине. Аналогичные трудности возникают с решением вопроса механизированной уборки отливок и отходов производства.

Организационная структура цехов литья в кокиль должна создаваться как законченный технологический комплекс и содержать ряд вспомогательных участков: изготовления и ремонта кокилей (с механизированным складом); ремонта оборудования;

расположения гидро- и электрооборудования; хранения запасных частей и узлов.

Проектные и организационные решения очистных участков цехов литья в кокиль не имеют никаких специфических отличий от аналогичных участков в цехах литья в песчаные формы. Однако трудоемкость этих операций, особенно при условии широкого применения металлических стержней, существенно уменьшается.

В проекты цехов включаются склады текущего хранения модельно-кокильной оснастки, емкость которых рассчитывается на трех-, четырехдневный задел. Склады готовой продукции рассчитываются на недельный выпуск и по возможности совмещаются с отделениями грунтовки отливок.

2. ПРИМЕРЫ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ЦЕХОВ

Комплексно-механизированный цех алюминиевого литья. Цех предназначен для производства фасонных отливок из алюминиевых сплавов для тракторных двигателей, топливных насосов и пусковых двигателей. Большинство отливок имеют сложную конфигурацию и различные толщины стенок (2—20 мм).

Цех представляет собой светлое двухэтажное здание и состоит из трех продольных пролетов шириной по 24 м, длиной по 180 м и высотой до нижнего пояса ферм 12,2 м и двух поперечных пролетов шириной по 24 м, длиной по 72 м и высотой до нижнего пояса ферм 12,2 м. К зданию примыкают бытовые помещения шириной 18 м. Общая длина цеха (без учета бытовых помещений) 228 м. Общая ширина цеха 72 м. Общая площадь цеха (без учета бытовых помещений) 24 192 м².

Состав производства: плавильное отделение, стержневое отделение, отделение производства отливок в кокилях с песчаными стержнями, отделение производства отливок в кокилях без песчаных стержней, отделение производства отливок на машинах под давлением, обрубочно-очистное отделение, термическое отделение. Вспомогательные службы: ремонтно-механическая мастерская, экспресс-лаборатории: спектральная, формовочных материалов, химическая; пирометрический пункт, склады оснастки, участок ремонта ковшей.

Комплексный технологический цикл поточного производства охватывает все этапы: от подготовки шихтовых материалов и плавки металла до укладки готовых отливок в контейнеры для отправки в механические цехи завода.

Плавка металла производится в индукционных печах ИАТ-2,5 полезной емкостью 2,5 т. В цехе установлено пятнадцать печей (три блока по пять печей в каждом пролете). Жидкий металл транспортируется в заливочный зал на специально оборудованных электрокарах и мостовыми кранами.

В двух пролетах цеха смонтированы 76 одно- и многопозиционных кокильных машин мод. 5924, 5926, 5946А, 5946Б и 5966, описанных в гл. XIX, а также шестнадцатипозиционная карусельная машина мод. 59К613. Схема расположения машин показана на рис. 200. Все машины работают в автоматическом цикле с дозирующими установками мод. Д63, Д250, Д730. Применение комплекса литейная машина—дозатор при изготовлении отливок на полуавтоматических кокильных машинах допускает их многостаночное обслуживание. Внешний вид пролета, в котором установлены комплексы, представлен на рис. 201.

Отливки автоматическими съемниками извлекаются из кокилей и системой склизов и конвейеров транспортируются к сортировочным кругам. Отливки с песчаными стержнями подаются в изолированный бокс для выбивки, после чего подвесным конвейером передаются на ленточные конвейеры, которые доставляют их на участок обрезки литников. Последний оборудован ленточными пилами и фрезерными станками. Очищенные отливки подвесными конвейерами поднимаются на второй этаж, где подвергаются термической обработке. Процесс термообработки осуществляется на семи автоматических линиях «закалка—старение».

Годные отливки в оборотной таре транспортируются на механизированный склад готовой продукции, расположенный на первом этаже.

Подготовка стержневых составов производится в трех смесителях типа 1А12, изготовление стержней — на четырех стержневых автоматах мод. 4544 (по горячим ящикам), двух полуавтоматах Б-83, трех автоматических установках мод. 310, четырех карусельных автоматах мод. 4509А. В стержневом отделении установлены два электрических сушила типа СКВЭ-3 и одно горизонтальное проходное электрическое сушило для подсушки исправленных и окрашенных стержней. Рядом с сушилом расположены стеллажи со штабелером для хранения стержней.

В каждом отделении и на участках имеются комнаты отдыха. Большое внимание обращено на микроклимат в помещении цеха. На местах повышенного газо- и пылевыведения установлены мощные бортовые отсосы. Свежий воздух, поступающий летом, охлаждается, а зимой подогревается.

Технико-экономические показатели: съем с 1 м² общей площади 0,91 т/год, выпуск на 1 работающего — 15,7 т/год.

Корпус для производства из алюминиевых сплавов деталей автомобильных двигателей. Здание размером 144×263 м имеет два поперечных 24-метровых пролета и восемь продольных 18-метровых пролетов. Высота 24-метровых пролетов (склад шихты и плавильное отделение) 15 м, а остальных — 12 м. Корпус алюминиевого литья подразделяется на плавильное отделение, цех литья под давлением и цех литья в кокиль.

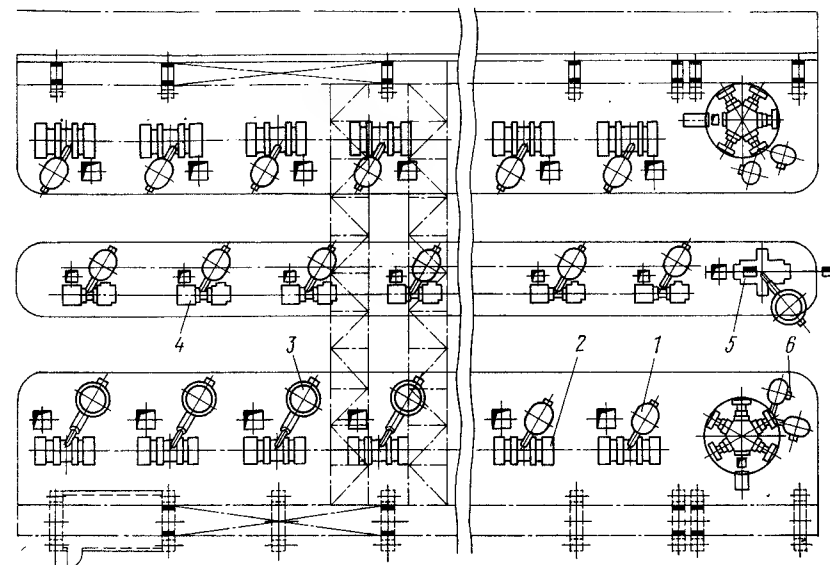


Рис. 200. Планировка кокильного пролета цеха цветного литья: 1 — пневмодозатор для алюминия (мод. Д250); 2 — кокильная машина мод. 5946; 3 — пневматический дозатор (мод. Д630); 4 — кокильная машина мод. 5924; 5 — кокильная машина мод. 5966; 6 — карусельная кокильная машина мод. 59К13

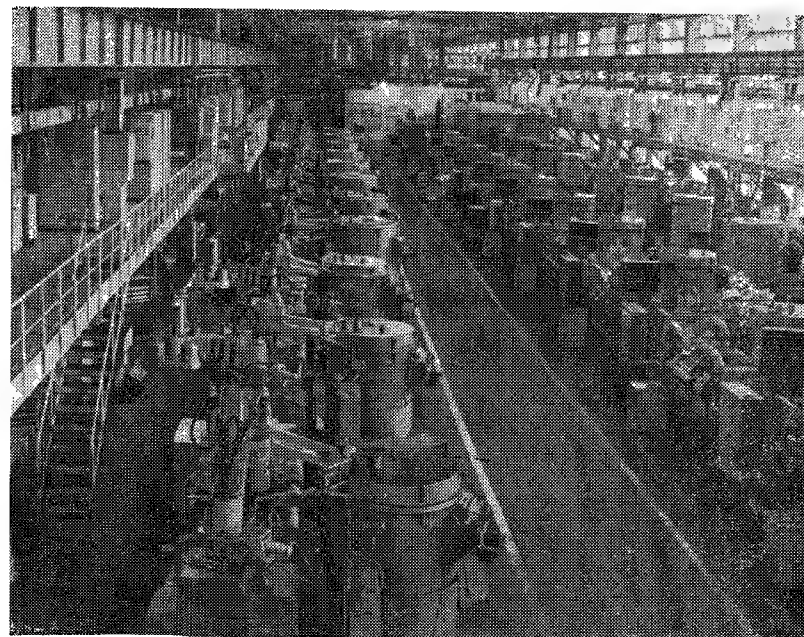


Рис. 201. Внешний вид заливочного пролета цеха алюминиевого литья

Запас шихтовых материалов и песков предусмотрен из расчета месячной потребности. Шихтовые материалы поступают в железнодорожных вагонах. Разгрузка осуществляется однотонными электропогрузчиками и электромостовым краном грузоподъемностью 5 т и дальнейшей транспортировкой в места хранения автопогрузчиками грузоподъемностью 2—3 т.

Плавка производится в газовых плавильных печах. Загрузка шихты в печь механизирована. Расплавленный металл переливается в печь, откуда пневмонасосом или из летки переливается в нагретый ковш. После доводки сплава в ковше, выдержки и дегазации ковш автопогрузчиком с поворотной вилкой или по монорельсу электроталью транспортируется к печи, где металл переливается в тигель раздаточной печи. Каждая плавильная печь предназначена для выплавки сплава только одной марки.

В цехе литья в кокиль установлены пять поточных линий (для производства поршней, впускного коллектора и картера рулевого управления, головки блока, цилиндра переднего тормоза) и стержневое отделение. Отливки изготавливаются на гидравлических полуавтоматах.

На термообработку детали подают в специальной таре автопогрузчиком. В цехе установлены две электрические шахтные печи для закалки и отпуска отливок.

Технико-экономические показатели цеха: общая площадь цеха 32 000 м², сьем с 1 м² площади — 0,73 т/год, выпуск на одного работающего 23,3 т/год.

Цех литья высокопрочного чугуна. Ширина основного пролета цеха 24 м, длина 192 м. Состав производства: плавильный участок, кокильное отделение, термическое отделение, обрубное отделение. Изготовление стержней, грунтовка отливок, изготовление оснастки и другие вспомогательные службы размещены в общих для ряда цехов помещениях корпуса литья для гидроаппаратуры. Шихтовые материалы подаются к плавильным печам из соседнего плавильного отделения. Загрузка шихты в электроплавильные печи производится мостовым краном грузоподъемностью 10 т. Плавка чугуна осуществляется в трех электрических индукционных печах. Жидкий металл переливается в миксеры, которые мостовым краном грузоподъемностью 10 т устанавливаются в поворотные стенды. Емкость каждого миксера 2 т. Подогрев осуществляется газом.

В цехе установлены две поточные кокильные линии. Каждая из них включает две камеры модифицирования чугуна магнием и четырнадцать автоматизированных кокильных машин с вертикальным разъемом. Подача жидкого металла из миксера в камеры модифицирования чугуна магнием, а затем для заливки в кокильные машины осуществляется специальными подвесками в ковшах

емкостью 200—300 кг. После выбивки отливки попадают на уборочный пластинчатый конвейер, а с него — на специальное устройство для укладки горячих отливок на поддоны, поступающие с термоагрегата. Нагруженный отливками поддон передается электроталью по монорельсу к одному из толкателей двухрядного проходного термоагрегата, в котором отливки проходят заданный режим термообработки. Нагрев термоагрегата осуществляется газом.

После термообработки отливки поступают на отрезку прибылей и литниковых систем шлифовальными кругами, после чего поступают для снятия заливок на стационарные и подвесные шлифовальные станки, а затем передаются на грунтовку.

Технико-экономические показатели цеха: общая площадь цеха 5460 м², сьем с 1 м² площади 0,65 т/год, выпуск на одного работающего 36 т/год.

Опытно-показательный цех литья электродвигателей из серого чугуна. Цех размещается в корпусе, состоящем из двух поперечных и трех продольных пролетов. В одном поперечном пролете шириной 24 м и длиной 72 м располагаются механизированный склад материалов и другие вспомогательные службы. Во втором поперечном пролете шириной 12 м и длиной 24 м размещены административно-бытовые помещения.

В трех продольных пролетах шириной 24 м и длиной 72 м каждый размещено основное технологическое оборудование. Высота пролетов 12 м. Все шихтовые материалы хранятся в железобетонных закромах и по мере необходимости загружаются магнитно-грейферным краном в расходные бункеры механизированных линий загрузки шихты. Из расходных бункеров шихтовые материалы поступают на весовые дозаторы. После взвешивания шихта подается на пластинчатый конвейер, который транспортирует их через поворотный лоток непосредственно в плавильные печи. Поворотные лотки оборудованы вытяжными зонтами. Выплавка синтетического чугуна из тонколистовых отходов динамной стали осуществляется в электрических индукционных печах промышленной частоты — ИЧТ-6. В цехе предусмотрена установка двух блоков по четыре печи в каждом. Одновременно в каждом блоке могут работать три печи. Для литья и термообработки предусмотрены четыре автоматизированные линии мод. А58 и А57. Подробно описаны эти линии в предыдущей главе. Там же показаны соответствующие схемы (см. рис. 180).

Обрубка заусенцев и зачистка мест разъема и остатков литниковых систем производится в обрубном отделении. Удаление заливок на отливках станин электродвигателей осуществляется на специальных токарных станках.

Технико-экономические показатели цеха: общая площадь цеха 7000 м², сьем с 1 м² площади 3,1 т/год, выпуск на одного работающего 105 т/год.

3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Комплексная качественная оценка технико-экономической эффективности основных способов литья осуществлена В. М. Шестопалом [142]. Результаты этой оценки приведены в табл. 36; цифры обозначают оценочные показатели по нисходящей линии — от 5 до 1 (чем выше эффективность, тем меньше коэффициент). Табличные данные позволяют провести сопоставительный анализ различных способов литья.

Таблица 36

Сравнительные характеристики разных способов литья

Характеристика технического или экономического показателя	Литье			
	в сырые песчаные формы	в оболочковые формы	под давлением	в кокиль
Неограниченность размеров	1	3	5	2
Влияние конфигурации	2	3	5	4
Применение различных сплавов	1	2	5	4
Стоимость оснастки	1	3	5	4
Продолжительность освоения	1	4	5	2
Наименьшая экономичная партия	1	3	5	4
Возрастание экономичности с увеличением партии	4	3	1	2
Производительность (темп)	4	3	1	2
Чистота поверхности отливок	5	3	1	4
Тонкостенность отливок	4	3	1	5
Выход годного	4	3	1	3
Величина допусков	5	3	1	3
Простота механизации и автоматизации	5	4	1	1

При выборе того или иного способа литья для производства конкретной отливки решающим фактором должен стать сравнительный технико-экономический расчет эффективности в конкретных условиях. Рассмотрим примеры.

Трудоемкость изготовления 1 т чугуновых станкостроительных отливок при переходе с литья в песчаные формы на литье в кокиль составили соответственно 86, 95 и 49,1 нормо-ч.

В табл. 37 приведено сравнение массы трех различных чугуновых отливок фрезерного станка, полученных литьем в песчаные формы и в кокиль.

Существенно снижаются трудоемкость, брак и масса отливок из алюминиевых сплавов при переводе их с литья в песчаные формы на кокильное литье. В табл. 38 это показано на примере ряда сложных отливок двигателя.

Экономические показатели специализированных цехов и

Таблица 37
Масса чугуновых отливок фрезерного станка

Отливка	Масса, кг, при литье		Экономия металла, %
	в песчаные формы	в кокиль	
Стол	107	86	20,6
Хобот	70	56	20
Салазки	87	74	15

участков литья в кокиль значительно превосходят аналогичные показатели механизированных цехов литья в песчаные формы. В то же время их величина зависит от мощности цехов, серийности производства, номенклатуры, сложности, массы отливок, степени механизации производства. Для различных отраслей машиностроения они различны.

Имеется ряд работ, в которых сделаны попытки обобщить экономические показатели цехов по отраслям машиностроения и по видам сплавов [64, 69]. Однако эти данные не однозначны (табл. 39).

Таблица 38

Сравнение экономических показателей производства отливок

Отливка	Литье в песчаные формы			Литье в кокиль		
	Трудоемкость, нормо-ч	Брак, %	Масса обрубленных отливок, кг	Трудоемкость, нормо-ч	Брак, %	Масса обрубленных отливок, кг
Головка цилиндра	4,7	25	28,0	3,1	4,0	16,5
Картер редуктора	23,0	20	62,0	3,0	4,7	45,0
Патрубок карбюратора	5,2	32	17,5	0,7	6,5	5,0
Диффузор	5,7	33	32,0	2,3	8,0	17,0

Таблица 39

Показатели работы чугунолитейных цехов [64]

Показатель	Сельхозмашиностроение		Станкостроение	
	Песчаные формы	Кокиль	Песчаные формы	Кокиль
Выход годного к металлозавалке, %	70	72	69	87
Выпуск на одного рабочего, т/год	47—55	130	45	93
Съем с 1 м ² площади, т/год	4,0	5,6	3,9	7,3
Стоимость 1 т литья, руб.	114	110	136,6	100

Вышеуказанные технические и экономические преимущества получения заготовок литьем в кокиль обуславливают непрерывное увеличение выпуска отливок этим способом. Номенклатура отливок, полученных в кокилях, расширяется не только за счет перевода ряда отливок с литья в песчаные формы на литье в кокиль, но также за счет замены сплава, например чугуна, на высокопрочные алюминиевые сплавы, стали — на высокопрочный чугун и т. д. При этом происходит резкое уменьшение трудоемкости механической обработки (иногда в 4—8 раз), повышение стойкости режущего инструмента в 2—3 раза. Все эти факторы стимулируют установившийся постоянный ежегодный рост выпуска кокильных отливок на 5—8%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов П. Н. Оборудование литейных цехов. М., Машиностроение, 1977. 510 с.
2. Амбарцумян Х. М. Технология отливки кокильной стальной ступицы. — Литейное производство, 1971, № 11, с. 41.
3. Анисович Г. А., Жмакин Н. П. Охлаждение отливки в комбинированной форме. М., Машиностроение, 1969. 136 с.
4. Афанасьев В. Г., Кузнецов П. Г. Некоторые вопросы управления научно-техническим прогрессом. — В кн.: Научное управление обществом, вып. 4, М., Мысль, 1970.
5. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. М., Машиностроение, 1973. 287 с.
6. Баландин Г. Ф. Основы теории формирования отливки. М., Машиностроение, 1976. 328 с.
7. Баранов А. А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов. Киев, Наукова думка, 1974. 231 с.
8. Болотов А. Н. Механизированная кокильная линия для отливки деталей из стали 110Г13Л. — Литейное производство, 1976, № 7, с. 34—35.
9. Болтенков И. Ф. Кокиль для отливки образцов. — Литейное производство, 1972, № 5, с. 40.
10. Борисов Е. С., Паньшин В. И., Рошин М. И. Стальные отливки в водоохлаждаемых металлооболочковых формах. — Литейное производство, 1971, № 8, с. 4—5.
11. Брилах М. М., Ясногорский В. И. Теплофизические свойства кокильных покрытий. — В кн.: Теплофизика в литейном производстве. Минск, АН БССР, 1963, с. 127—131.
12. Бураков С. Л., Рывкис Я. М., Яцунский Р. П. Влияние усилий смыкания кокильной машины на деформацию рабочей плиты кокиля. — Кузнечно-прессовое и литейное оборудование. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1966, № 5, с. 23—25.
13. Бураков С. Л., Серебро В. С. Деформация и перемещения в облицованных кокилях. — Технология производства, научная организация труда и управления. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1977, № 1, с. 7—9.
14. Бураков С. Л., Хомяк Ю. М. Аналитический метод определения усилий сжатия кокилей в период заливки. — Известия вузов. Машиностроение, 1969, № 9, с. 169—173.
15. Васильев А. А., Яковлев М. Т., Смирнов В. Н. Отливка в кокиль гребенчатых втулок. — Литейное производство, 1968, № 11, с. 38.
16. Вейник А. И. Тепловые основы теории литья. М., Машгиз, 1953. 384 с.
17. Вейник А. И. Испытание кокильных красок на теплопроводность. М., Машгиз, 1956. 231 с.

18. Вейник А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959. 183 с.
19. Вейник А. И. Теплообмен между слитком и изложницей. М., Metallurgizdat, 1959. 357 с.
20. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. М., Машгиз, 1960. 436 с.
21. Вейник А. И. Расчет отливки. М., Машиностроение, 1964. 404 с.
22. Вейник А. И. Термодинамика необратимых процессов. Минск, Наука и техника, 1966. 360 с.
23. Вейник А. И. Термодинамика, изд. 3-е. Минск, Высшая школа, 1968. 464 с.
24. Вейник А. И. Термодинамика литейной формы. М., Машиностроение, 1968. 336 с.
25. Вейник А. И. Кокиль. Минск, Наука и техника, 1972. 352 с.
26. Вейник А. И. Термодинамическая пара. Минск, Наука и техника, 1973. 384 с.
27. Вейник А. И. Пути повышения и методы расчета эффективности производства и качества отливки. — В кн.: Пути повышения качества деталей, изготавливаемых литьем под давлением. Под ред. Ю. Ф. Игнатенко. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания по литью под давлением в г. Ворошиловграде 12—14 октября 1976 г. М., НТО МАШПРОМ, 1976, с. 85—97.
28. Вейник А. И. Информационная теория эффективности и качества в литейном производстве. — В кн.: Прогрессивные процессы в литейном производстве. Под ред. А. К. Машкова. Новосибирский инженерно-строительный институт. Новосибирск, 1977, с. 9—17.
29. Вейник А. И. Метод расчета эффективности литейной технологии и качества отливки. — В кн.: Пути совершенствования литейных процессов и повышения качества литья в республике. Тезисы докладов республиканской межотраслевой конференции литейщиков в г. Каунасе 23—24 ноября 1978 г., ч. I. Каунас, НТО МАШПРОМ Литовской ССР, 1978, с. 33—38.
30. Вейник А. И. Новый метод определения количества и ценности информации при расчетах на ЭВМ литейной технологии. — В кн.: Пути совершенствования литейных процессов и повышения качества литья в республике. Тезисы докладов республиканской межотраслевой конференции литейщиков в г. Каунасе 23—24 ноября 1978 г., ч. I. Каунас, НТО МАШПРОМ Литовской ССР, 1978, с. 39—61.
31. Вейник А. И. О проектировании технологии литья. — В кн.: Прогрессивные технологические процессы заготовительного производства. Под ред. А. К. Машкова, Новосибирский инженерно-строительный институт. Новосибирск, 1978, с. 3—15.
32. Вейник А. И. Принципы автоматического проектирования на ЭВМ литейной технологии. — В кн.: Пути совершенствования литейных процессов и повышения качества литья в республике. Тезисы докладов республиканской межотраслевой конференции литейщиков в г. Каунасе 23—24 ноября 1978 г., ч. I. Каунас, НТО МАШПРОМ Литовской ССР, 1978, с. 3—32.
33. Вейник А. И., Шарипова М. К. Информационная оценка различных технологий литья. — В кн.: Прогрессивные процессы в литейном производстве. Под ред. А. К. Машкова. Новосибирский инженерно-строительный институт. Новосибирск, 1978, с. 18—24.
34. Вертман А. А., Самарин А. М. Свойства расплавов железа. М., Наука, 1969. 280 с.
35. Влияние трения между отливкой и кокилем на образование трещин в отливках из ковкого чугуна. В. Т. Федорченко, Н. П. Дубинин, Е. А. Васильев, В. Н. Гершун. — Литейное производство, 1975, № 4, с. 25—26.
36. Воздвиженский В. М., Жуков А. А., Чистяков В. В. Чугун для изготовления крупных кокилей. — Литейное производство, 1971, № 12, с. 37—38.
37. Возжи Ю. В., Петров В. И., Мошкин Б. И. Литье деталей арматуры

- из бронзы Бр. Амц 9-2 в кокилях с керамической облицовкой. — Литейное производство, 1977, № 8, с. 40.
38. Выбор зазоров в подвижных частях кокилей при литье алюминиевых сплавов. С. Т. Лучко, Ф. Г. Ляшко, Л. М. Солонский и др. — Литейное производство, 1973, № 1, с. 30—31.
39. Галдин Н. М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов. М., Машиностроение, 1978.
40. Ганзаев Ю. Д., Пряхин В. А., Болотовский Н. И. Беспыльный дробе-метный аппарат для очистки кокилей. — Литейное производство, 1977, № 9, с. 39—40.
41. Гаркушенко В. А., Туник А. А. Повышение плотности крупных кокильных отливок из сплава АЛ5. — Литейное производство, 1968, № 9, с. 12.
42. Гетьман Е. А., Батизат В. Н., Величко В. П. Автоматизация процесса покраски кокилей. — Литейное машиностроение. Экспрессинформация (НИИ-МАШ), 1977, № 4, с. 7—11.
43. Гетьман В. Г., Кремнев Л. А. Заливочные установки с выдачей металла за счет энергии сжатого воздуха и электромагнитного поля. — Литейное машиностроение. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1973, № 5, с. 3—12.
44. Гилевич И. Б., Глазунов Е. И. Литье свинцовистой бронзы намораживанием. — Литейное производство, 1973, № 5, с. 40.
45. Гиришович Н. Г. Кристаллизация и свойства чугуна в отливках. М., Машиностроение, 1966. 562 с.
46. Горенко В. Г., Конопацкий В. А., Корнненко В. И. Теплоизоляционные покрытия кокилей при наплавке деталей жидким металлом. — В кн.: Литье биметаллических изделий. Киев, 1976, с. 109—111.
47. Горохович А. Ю. Литье оловянистых бронз в кокиль с металлическим стержнем. — Литейное производство, 1971, № 8, с. 38—39.
48. Гуляев Б. Б. Литейные процессы. М.—Л., Машгиз, 1960. 416 с.
49. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. Л., Машиностроение, 1976. 214 с.
50. Дмитренко Л. С., Серебро В. С. Термическая деформация оболочек на смоляном связующем. — Литейное производство, 1971, № 6, с. 8—9.
51. Драпкин Б. М., Жуков А. А., Пыгузов Ю. В. Некоторые особенности начальной стадии термоусталостного разрушения чугуна. — Металловедение и термическая обработка, 1973, № 11, с. 40—41.
52. Дубинин Н. П. Чугунное литье в металлических формах. М., Машгиз, 1956. 320 с.
53. Дубинин Н. П. Механизация и автоматизация кокильного литья. М., Машгиз, 1959. 392 с.
54. Дульнев Г. Н., Заричьяк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л., Энергия, 1974. 264 с.
55. Единый тарифно-квалификационный справочник работ и профессий рабочих, вып. 2, изд. 2-е. М., Машиностроение, 1973.
56. Есьман Р. И., Жмакин Н. П., Шуб Л. И. Расчеты процессов литья. Минск, Высшая школа, 1977. 261 с.
57. Зарецкий Л. Ш., Ровкач В. Р., Влияние условий затвердевания на структуру и свойства оловянистой бронзы. — В кн.: Теплообмен между формой и отливкой. Минск, Высшая школа, 1967, с. 201—205.
58. Зарубежные кокильные машины. С. Л. Бураков, В. А. Гурович, Н. И. Зинкевич и др. Обзор. М., 1972, 63 с. (НИИМАШ. Литейное машиностроение. С-IV).
59. Иванов В. П., Спасский А. Г. Влияние окислов алюминия на процессы газонасыщения и газовыделения в алюминии и его сплавах. — Литейное производство, 1963, № 1, с. 26—28.
60. Ионов В. В., Рожнов Г. Г. Литье закрытых крыльчаток в кокиль. — Литейное производство, 1975, № 6, с. 37—38.

61. Исследование влияния добавок некоторых элементов на горячеломкость магниевых сплавов./А. Ф. Жбанов, Н. Н. Барбашин, В. В. Серебряков, В. С. Макарин. — В кн.: Повышение качества и надежности литых изделий. Межвузовский сборник научных трудов. Ярославль, Ярославский политехнический институт, 1976, с. 57—62.
62. Исследование теплового режима отливки и кокиля при литье корпуса топливного насоса тракторного двигателя./Э. А. Гурвич, В. Ф. Драченев, Р. И. Есман и др. — В кн.: Металлургия. Республиканский межведомственный сборник. Литейное производство. Вып. 9, Минск, 1977, с. 55—57 (Белорусский политехнический институт).
63. Караник Ю. А. Изготовление кокильных отливок с выплавляемыми стержнями. — Литейное производство, 1976, № 12, с. 74—75.
64. Карталов В. С. Экономическая эффективность прогрессивных способов литья. Киев, Техника, 1972. 113 с.
65. Кипер И. К., Оболенцев Ф. Д., Серебро В. С. Исследование закономерностей вынужденной фильтрации газа через песчаный стержень. — Известия вузов. Черная металлургия, 1977, № 9, с. 145—148.
66. Ключев Н. И. Литейные свойства чугуна. М., Машиностроение, 1968. 132 с.
67. Кобринская Б. Н. Регенерация плакированного песка при литье в облицованные кокили. — Технология производства, научная организация труда и управления. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1971, вып. 10, с. 1—4.
68. Кобринская Б. Н., Мороз Е. К., Серебро В. С. Газотворность смесей для облицовки. — Технология производства, научная организация труда и управления. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1971, вып. 8, с. 1—3.
69. Кокильное литье. Справочное пособие/Н. П. Дубинин, О. А. Беликов, А. Ф. Вязов и др. М., Машиностроение, 1967. 459 с.
70. Кокильные отливки из ковкого чугуна./А. Г. Колесниченко, В. Т. Федорченко, В. Н. Тетерин и др. — Литейное производство, 1967, № 8, с. 36—37.
71. Колобнев И. Ф., Крымов В. В., Мельников А. В. Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов. М., Машиностроение, 1974. 415 с.
72. Колотило Д. М., Челябинов Л. М. Углеродные литейные формы. Киев. Наукова думка, 1971. 161 с.
73. Комиссаров В. А. Силовое взаимодействие отливки с металлическими стержнями и кокилем. — В кн.: Кокильное литье в машиностроении. М., 1964, с. 1—15 (ЦИНТИАМ. ОМ-11. Литейное производство и оборудование).
74. Комиссаров В. А. Применение крупных металлических стержней при литье чугуна в кокиль. — Литейное производство, 1965, № 3, с. 4—5.
75. Комиссаров В. А., Рывкис Я. М., Серебряков В. А. Автоматическое литейное оборудование и приборы контроля швейцарских фирм. М., 1971, 56 с. (НИИМАШ. Литейное оборудование. С-IV).
76. Комплексная обработка магниевых сплавов МЛ15 магнетитом и ультразвуком./М. В. Чухлов, И. П. Рыженкова, З. Н. Христонова, Н. Ф. Горбунов. — Литейное производство, 1977, № 10, с. 15—16.
77. Корольков А. М. Литейные свойства металлов и сплавов. М., Наука, 1967. 199 с.
78. Косенков М. Г. Отливка бронзовых заготовок в кокили с металлическим пустотелым стержнем. — Химическое и нефтяное машиностроение, 1977, № 2, с. 42.
79. Крылов В. Н., Ремизов И. И., Томилов В. И. Применение фильтров при литье алюминиевых сплавов в кокиль. — Литейное производство, 1976, № 2, с. 43—44.
80. Ксенофонов В. П. Влияние охлаждающей способности формы на износостойкость отливок из стали Г13Л. — Литейное производство, 1969, № 1, с. 40—41.

81. Ксенофонов В. П. Кокиль с оболочкой из жидкой самотвердеющей стали. — Литейное производство, 1970, № 9, с. 41.
82. Ксенофонов В. П., Токарев Ж. В., Пашков А. И. Литье сплава АЛ2 в кокиль методом вакуумного всасывания. — Литейное производство, 1973, № 5, с. 40.
83. Кулыба Н. А., Рева А. Т. Применение диффузионных покрытий из карбида титана. — Технология и организация производства. Научно-производственный сборник (УкрНИИТИ), 1976, № 3, с. 29—32.
84. Куманни И. Б. Вопросы теории литейных процессов. М., Машиностроение, 1976. 214 с.
85. Кун Т. Структура научных революций. Пер. с англ. М., Прогресс, 1975.
86. Курдюмов А. В., Пикунев М. В., Бахтияров П. А. Плавка и затвердевание сплавов цветных металлов. М., Металлургия, 1968. 228 с.
87. Линдсей П., Норман Д. Переработка информации у человека. Пер. с англ. М., Мир, 1974.
88. Литье штампы напряженной конструкции./С. Н. Примеров, В. В. Тушаев, В. А. Чернов, В. И. Гусев. — Литейное производство, 1976, № 1, с. 37.
89. Литье в кокиль корпусов насосов из серого чугуна./Ю. П. Поручиков, М. Д. Филингов, А. В. Афонаскин, Г. Н. Бейзер. — Литейное производство, 1976, № 11, с. 26.
90. Литье в кокиль стальных заготовок для прокатки железнодорожных колес./Н. М. Фетисов, М. Ю. Шифрин, А. М. Осипов и др. — Литейное производство, 1975, № 4, с. 27—28.
91. Литье в облицованные металлические формы. /Е. Г. Николаенко, Я. М. Рывкис, В. С. Серебро, Р. Л. Снежной. — Литейное производство, 1969, № 1, с. 1—5.
92. Литье поршней в кокиль с применением стержня-моноклина./Б. Н. Галчинский, М. Я. Гирович, Е. Г. Чермошнюк, В. А. Дубинцев. — Литейное производство, 1973, № 10, с. 38—39.
93. Магнитодинамическая установка для подогрева и разлива чугуна./В. П. Полищук, В. К. Погорский, С. Д. Макеев и др. — Литейное производство, 1974, № 4, с. 12—13.
94. Мальцев В. М. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М., Металлургия, 1970. 368 с.
95. Массовое производство кокильных отливок из высокопрочного чугуна./С. А. Жалимбетов, Э. Д. Кротов, Ю. В. Струц и др. — Литейное производство, 1975, № 3, с. 18—20.
96. Машков А. К. К проблеме кокиля. Омск, Западно-Сибирское книжное издательство, 1975. 105 с.
97. Машков А. К., Гурдин В. И. Армированные железоборидные материалы. — Порошковая металлургия, 1976, № 3, с. 54—57.
98. Механизация и технология производства кокильного литья./Е. Г. Николаенко, С. Л. Бураков, Я. Б. Айзенштейн и др. — Киев, Техника, 1969. 228 с.
99. Межфазное натяжение и форма графита, кристаллизующегося в жидком чугуне./Б. С. Мильман, Н. Н. Александров, В. Т. Соленко и др. — Литейное производство, 1976, № 5, с. 3—6.
100. Михайлов М. Д. Нестационарные температурные поля в оболочках. М., Энергия, 1967. 374 с.
101. Мишагин А. М., Терентьев В. А., Бобков В. Л. Литье алюминиевых сплавов в водоохлаждаемых кокилях. — Литейное производство, 1976, № 6, с. 40—41.
102. Мишагин А. М., Терентьев В. А., Гомоюнов В. Ф. Факторы точности дозирования алюминиевых сплавов. — Литейное производство, 1973, № 3, с. 19—20.
103. Оболенцев Ф. Д. Сравнительная оценка точности отливок, изготовленных различными способами. — В кн.: Специальные способы литья. Л., Машиностроение, 1971, с. 35—47.

104. Осокин А. М. Точность кокильных отливок. — Литейное производство, 1965, № 4, с. 29—30.
105. Перцов В. А., Сандомирский В. Я. Получение деталей кокилей без механической обработки. — Литейное производство, 1971, № 11, с. 44.
106. Петриченко А. М. Практика литья в металлические формы. Киев — М., Машгиз, 1952. 167 с.
107. Петриченко А. М. Теория и технология кокильного литья. Киев, Техника, 1967. 250 с.
108. Петриченко А. М., Скобло Т. С., Скобло Ю. С. О причинах разрушения кокилей. — Известия вузов. Черная металлургия, 1975, № 5, с. 137—140.
109. Пименов А. М., Чурсин В. М., Дегтярев Ю. В. Влияние состава и условий плавки латуни ЛК 803Л на ее газонасыщенность. — Литейное производство, 1968, № 9, с. 6—7.
110. Плавка и литье алюминиевых сплавов. Справочное руководство. М., Металлургия, 1970. 415 с.
111. Плазменное напыление кокилей./И. Е. Шульман, Я. М. Вишневецкий, А. К. Лимарев, А. Н. Гончаров. — Литейное производство, 1976, № 2, с. 35—36.
112. Плазменное напыление кокилей./Д. Л. Галайко, Р. Л. Снежной, Е. Б. Шицман и др. — Литейное производство, 1973, № 9, с. 35.
113. Плазменное напыление кокилей./В. Б. Райцес, М. М. Джонс, В. П. Рутберг и др. — Литейное производство, 1974, № 3, с. 2—3.
114. Повышение стойкости чугунных кокилей./Н. М. Фетисов, Н. А. Рюмшин, В. М. Супоницкий, В. И. Земляной. — Литейное производство, 1970, № 11, с. 40—41.
115. Полищук В. П., Трефняк В. А., Гольберг М. Ф. Дозирование алюминиевых и цинковых сплавов в машины литья под давлением магнитодинамической установкой МДН-6. — Литейное производство, 1973, № 7, с. 12—13.
116. Получение гидроплотных отливок из оловянных бронз в металлооблочковых формах./В. А. Кашинцев, Г. Н. Касаткин, А. А. Рыжиков, Г. И. Тимофеев. — Литейное производство, 1974, № 11, с. 11—12.
117. Полюхов В. В. Противопригарное покрытие кокилей при литье бронзы. — Литейное производство, 1968, № 4, с. 38.
118. Померанцев А. А. Физические начала теплообмена и газовой динамики. М., Энергия, 1977. 248 с.
119. Рабинович Б. В. Введение в литейную гидравлику. М., Машиностроение, 1966. 423 с.
120. Ракогон В. Г. Теория и практика изготовления стержней пескодувным способом. М., Машгиз, 1962. 184 с.
121. Ремнев А. Б. Определение конструктивных параметров пескодувных резервуаров. — Литейное машиностроение. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1971, № 5, с. 5—8.
122. Ремнев А. Б., Рывкис Я. М. Исследование процесса истечения смеси через пневматические пескодувные сопла. — Технология производства, научная организация труда и управления. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1970, № 11, с. 5—8.
123. Рыжиков А. А., Карякин Т. И., Кимстач Г. М. — Интенсификация процессов рафинирования и модифицирования Al—Si сплавов. — Литейное производство, 1968, № 9, с. 7.
124. Сварика А. А. Покрытие литейных форм. М., Машиностроение, 1977. 216 с.
125. Седлов Л. М. Ультразвук при кокильной отливке поршней. — Литейное производство, 1969, № 1, с. 30—31.
126. Серебро В. С. Об образовании зазора между отливкой и металлической формой. — Литейное производство, № 11, 1965, с. 35—36.
127. Серебро В. С. Расчет температурного поля металлической литейной формы. — Известия вузов. Черная металлургия, 1968, № 11, с. 163—167.

128. Серебро В. С. Математическое исследование охлаждения отливок в облицованных кокилях. — Литейные свойства сплавов. Киев, ИПЛ АН УССР, 1972, с. 43—44.
129. Серебро В. С., Марьянский А. В. Уточненный анализ затвердевания отливок в комбинированной форме. — Известия вузов. Машиностроение, 1975, № 12, с. 106—108.
130. Серебро В. С. Особенности формирования стальной отливки в оболочковой форме. — Литейное производство, 1977, № 8, с. 5—8.
131. Скарбинский М. Конструирование отливок. Пер. с польск. М.—Л., Машгиз, 1961, 574 с.
132. Снежной Р. Л. К теории образования шаровидного графита в чугунах. — Литейное производство, 1974, № 5, с. 12—13.
133. Современное оборудование и технология литейного производства за рубежом./Д. И. Поляков, И. А. Онуфриев, И. П. Бережанов и др. М., 1970, 288 с. (НИИМАШ. Литейное машиностроение С-IV).
134. Сорокотяж С. И. Отработка конструкции и основных параметров управляемых механических сопел для пескодувных головок с постоянным давлением воздуха. — Литейное машиностроение. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1971, № 5, с. 1—4.
135. Сорокотяж С. И. Производительность и пределы регулирования двухпозиционной заливочной машины с гидроприводом. — Литейное машиностроение. Научно-технический реферативный сборник (НИИМАШ), 1973, № 12, с. 5—7.
136. Сорокотяж С. И., Рывкис Я. М., Снежной Р. Л. Техничко-экономические и социальные аспекты механизации и автоматизации заливки литейных форм. — Литейное производство, 1978, № 2, с. 1—2.
137. Степанов Ю. А. и др. Литье тонкостенных конструкций. М., Машиностроение, 1966. 255 с.
138. Стивенс С. С. Экспериментальная психология, т. II. Пер. с англ. М., ИИЛ, 1963. 1039 с.
139. Тейх В. А., Мартынов А. В., Петрушин Г. Д. Влияние модифицирования на структуру и свойства кокильных отливок из стали 35Л. — Литейное производство, 1971, № 5, с. 40.
140. Температурный режим облицованной металлической формы при циклической эксплуатации. — В кн.: Тепловые процессы в отливках и формах. Труды XV совещания по теории литейных процессов. М., Наука, 1972, с. 127—132. Авт.: В. С. Серебро, А. И. Бренер, Л. Я. Нетес и др.
141. Тепломеханическая стойкость крупных цельнолитых кокилей./П. В. Черногоров, А. П. Никифоров, В. А. Кондрашов и др. — В кн.: Формовочные материалы и формообразование. Киев, 1975, с. 166—173 (АН УССР. Институт проблем литья).
142. Технические и экономические основы литейного производства. Под ред. В. М. Шестопада. М., Машиностроение, 1974. 304 с.
143. Технологические основы и комплексная механизация процесса получения отливок из черных сплавов в облицованных кокилях./Р. Л. Снежной, В. С. Серебро, Я. М. Рывкис, Б. В. Рабинович. — В кн.: 40-й Международный конгресс литейщиков. Часть I. М., НИИМАШ, 1975, с. 97—112.
144. Тимошенко С. П., Войновский-Крингер С. Пластинки и оболочки. М., Госфизтехиздат, 1963. 314 с.
145. Типовые технологические процессы литья в кокиль деталей — представителей номенклатуры отрасли из серого и высокопрочного чугунов на кокильных машинах. РТМ2 МТ 20-1-75. М., 1975.
146. Усадка термообрабатываемых кокильных чугунных отливок с металлическими стержнями./Н. И. Кобелев, М. А. Любарский, И. А. Дибров и др. — Литейное производство, 1971, № 5, с. 41.
147. Усов Л. Н., Борисенко Л. И. Применение плазмы для получения высокотемпературных покрытий. М.—Л., Наука, 1965. 86 с.

148. Устранение отбела в тоикостеинных чугуиных кокильных отливках комплексными модификаторами. /А. С. Налетов, М. М. Малашии, Е. Д. Демьянов и др. — В кн.: Прогрессивные процессы в литейном производстве. Новосибирск, изд. Новосибирского инженерно-строительного института, 1977, с. 45—52.
149. Филатов А. И. Отливка головок кислородных продувочных форм. — Литейное производство, 1969, № 1, с. 39—40.
150. Флемингс М. Процессы затвердевания. М., Мир, 1977. 423 с.
151. Цветное литье. Легкие сплавы. Инженерная монография. Под редакцией И. Ф. Колобнева. М., Машиностроение, 1966. 392 с.
152. Ченери Х. Б. Выведение функции процесса и производственной функции на основе инженерных данных. — В кн.: Исследования структуры американской экономики. Под. ред. В. Леонтьева. Пер. с англ. М., ГСИ, 1958, с. 337—368.
153. Черкасов Л. М., Колесник Л. А., Могилев В. К. Влияние модифицирования на окислительность и ростоустойчивость доменного и ваграночного чугунов, применяемых для отливки изложниц. — Литейное производство, 1969, № 10, с. 39—41.
154. Чернов М. Н., Лазебный Ю. Т. Особенности литья в кокиль колес гидротрансформатора. — Литейное производство, 1967, № 7, с. 36—38.
155. Швабский М. М., Савина Р. П., Догадкина М. Г. Отливка бронзовых втулок и полувтулок больших диаметров. — Технология и организация производства. Научно-производственный сборник (УкрНИИНТИ), 1971, № 5, с. 52—53.
156. Шиколаев В. П. Влияние скорости кристаллизации на структуру и свойства отливок из стали 110Г13Л. — Литейное производство, 1976, № 1, с. 38.
157. Шидман Е. Б., Лернер Ю. С. Номограммы для расчета литниковых систем кокильных отливок из магниевого чугуна. — Литейное производство, 1969, № 12, с. 25—26.
158. Шидман Е. Б., Снежной Р. Л., Нетес Л. Я. Предотвращение образования окисных плен в отливках из магниевого чугуна. — Литейное производство, 1970, № 12, с. 6—8.
159. Шляпин В. Н., Березин П. П. Литниковая система кокильной отливки тракторного поршня из сплава АЛ10В. — Литейное производство, 1967, № 3, с. 37—39.
160. Эндрюс Р. С. Л. Техника оболочкового литья в США. Пер. с англ. М., Машиностроение, 1968. 224 с.
161. Arnaud D., Fiat M., Morice J. Etude de la tendance a la crique des laitons Cu—Zn 40. — Fonderie, 1976, 31, N. 362, 413—416.
162. Butz W. Kokillenguss — eine Alternative zu Stahl. Gus. bringt in der Hydraulik Einsparungen bis 50%. — Techno-Tip, 1975, 5, N. 6, 79—80.
163. Chudoba K., Ulman Zb., Maszyny I. Urzadzenia odlewnicze na 40 MTP. — Przegląd Odlewnictwa, 1972, 22, N. 1, 23—27.
164. Drossel G., Walter H. G. Die technischen und technologischen parameter zur anwendung anodisen oxydierter Al—kokillen in der Zeisht metallgiesserei. — Giessereitechnik, 1971, 17, N. 9, 296—299.
165. Flemings Merton C. Fluidity of metals—techniques for producing ultra-thin section castings. — The British Foundryman, 1964, 57, N. 7, 312—325.
166. Großkokillen—Reinigungsvorrichtung. — Masch. und Werkzeug, 1977, 78, N. 11, 50—52.
167. Heyman P. Zusammenhang zwischen Gußstückwanddicke, Formstoffdicke und Gußstückhärte beim Stützschaalen—Maskenform—Verfahren. Giessereitechnik, 1969, 15, N. 12, 401—405.
168. Huskonen Wallace D. Introduction mechanized pouring of ferrous metals. — Foundry, 1972, 100, N. 11, 32—35.
169. Kniagin G. Staliwo. Metallurgia i odlewnictwo. Wyd. «Ślask», 1972, 528.

170. Kondic V. Metallurgical Principles of Founding. Edward Arnold Ltd. London, 286.
171. Kunath D., Sturm J. Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Kokillengrauguss durch eine neue Giessmethode zur füllung der metallischen Dauerform. — Freiburger Forschungshefte, 1975, 6, N. 178, 103—118.
172. Kydlo I. Ziti temperované liting do kovových forem. — Slevarenstvi, 1962, 10, N. 10, 378—379.
173. Longa W. Krzepnicie odlewo'w w formach piaskowych. Wyd. «Ślask», 1973, 272.
174. Marincek B. Zur haltbarkeit der Stahlwerkskokillen. — Schweiz. Arch., 1971, 37, N. 10, 342—345.
175. Morice M. Conditions thermiques d'utilisation de coquilles pour la coulée par gravité des alliages d'aluminium. — Hommes et fonderie, 1971, N. 17, 17—25.
176. Nehru K. V. K., Seshadry M. R., Ramachandran E. G. Influence of insulating mold coatings on the solidification of copper castings in metallic molds and thermal behavior of molds. — AFS cast metals research journal, 1974, 10, N. 3, 111—113.
177. Odum H. T. Environment, Power and Society. N. Y., 1971.
178. Parent—Simonin S., Parisien J. Permanent Mold Casting of Irons: gray iron and malleable castings with good machinability in the as-cast condition. — Transactions of the AFS, 1973, 81, 260—270.
179. Pilz L. Anwendung des Vakuums in sand—und Kokillenguss zur Herabsetzung des Ausschussanfalls. — Giessereitechnik, 1956, 2, N. 9, 202—206.
180. Serwe G. Die Fertigung von Bremstrommeln und Bremsscheiben nach dem Stützschaalenform Verfahren. — Giesserei, 1971, N. 10, 281—284.
181. Schürmann E., Dohmen W. Vergleich gemessener und berechneter Temperaturfelder in sandbeschichteten Kokillen bei der Erstarrung von Gusseisen und Berechnung der Erstarrungszeit. — Giesserei—Forschung, 1972, 24, N. 4, 157—164.
182. Schürmann E., Dohmen W. Messung der Erstarrungsgeschwindigkeit von Gusseisen in sandbeschichteten Kokillen und die Entwicklung einer zugehörigen Erstarrungsgleichung. — Giesserei, 1972, 59, N. 19, 569—576.
183. Schürmann E., Loblich H. Einfluss der Maskendicke einer sandbeschichteten Kokille auf Erstarrungsgeschwindigkeit, Graphitausbildung und Härte von Gusseisen. — Giesserei Forschung, 1975, N. 3, 95—101.
184. Snezhnoy R. L., Zhukov A. A. Factors affecting Graphite shape in cast iron. In: Metallurgy of cast iron (Proceedings of second international symposium), Vevey, Switzerland, Delta Publ., Co., 1975, 13—29.
185. Sridhara S., Srinivasan M. N., Seshadri M. R. Studies on gravitydiecast malleable irons. — Foundry Trade J., 1975, 138, N. 3054, 813—816, 818, 819.
186. Yasue K., Isotani M., Kondo Y., Shimada K. On the heat treatment of metal mold cast iron. — J. Jap. Foundryman's Soc., 1974, 46, N. 8, 695.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Анодирование 23, 90
Анодированного слоя свойства 80, 90

В

Вакуумное всасывание 288
Вентиляция кокиля 217
Взаимодействие систем 118
— типа затрат 122
— — коалиции 121
— — конфликта 121
— — накопления 122
— — проводимости 123
— — сопротивления 123
— — сотрудничества 121
— экстремальное 134
Воко 164
— желаний 165
— знаний 165
— навыков 165
— собственности 165
Вязкость 50, 225, 242

Г

Газопроницаемость 210
— пакета иглолок 215
— песчаной формы 215

Д

Дарси закон фильтрации 210
— коэффициент 211

Деформация упругая 66, 210
— пластическая 66
Дефицит питания 50, 53
Диаграмма питания 52, 55
Динамика 115

Ж

Жидкотекучесть 225, 242, 272, 273
293, 301

З

Зазор газовый 16, 48, 57
Закон взаимности 112
— диссипации 114
— переноса 112
— состояния 110
— сохранения информации 101, 110
— — энергии 100, 110
— увлечения 114
Зародыш 38
Затвердевание 14, 33, 274
— объемное 50, 51
— одновременное 50, 54
— последовательное 49, 50
Затравочное включение 38

И

Игольчатая вставка 217
Изготовление кокилей литьем 199
— — из порошков 218
Информационный 104, 105, 149
Информации абсолютность 166

— абсолютный нуль 150
— выработка 162
— единица 150
— количество 148, 149
— объем 151, 162
— «передача» 133, 166
— семантика 163
— сложность 151, 162
— теория 148
— — термодинамическая 166
— — традиционная 148, 167
— — Шеннона 167
— ценность 166
— шкала 149
Информационный взрыв 162
Информационный 149
Информация 148
— обобщенная 148
— традиционная 148
— Шеннона 167
Информодвижущая сила 119
Информоемкость 111
— спектральная 166
— специфическая 166
— удельная 117
— цепи 118
Информопроводность 113
Информосопротивление 113
— спектральное 166
— специфическое 166
— цепи 119
Информэнергия 102, 106

К

Качества критерий 106
— — универсальный 106
— планирование 145
— свойства 166
— семантика 163
— смысловой спектр 164
— шкала 149
Качество 101
— кокиля 119
— — при изготовлении 126
— — — проектировании 123
— — — старении 131
— — — хранения 130
— — — эксплуатации 132
— литейного оборудования 137
— отливки 135
— кокильной 137
— — размерное 135
— персонала 147
— системы 115
— — взаимодействующей 118
— — кинетической 116
— — кинетодинамической 117
— — статической 115
— — статодинамической 116
— — специфическое 162
— — среднее 162
Квалификация 147
— инженера 160
— персонала 147
— рабочего 161
— техника 160
Кинетика 115
Кинетодинамика 115
Классификация систем 115
— технологических цепей 119
Кокиль 5
— алюминиевый 179
— — анодированный 179
— двухслойный 221
— игольчатый 214
— из нормализованных элементов 213
— неразъемный 71
— облицованный 7, 180, 307, 311, 314
— однослойный 190
— плоский 68
— составной 221, 223, 311
— цилиндрический 68, 71
Конвейер кокильный 329, 356
Коробление кокиля 57, 60, 210
Коэффициент взаимности 112
— газопроницаемости 211, 216
— информоемкости 111
— информотдачи 116
— информопроводности 116
— информосопротивления 113
— увлечения 114
Кристаллизация кинетика 38

- параметра 37
- скорость 38
- Кристаллизация 33
 - графита 40
- Критерий качества 106
 - параметрический 13
 - подобию 98
 - эффективности 107

Л

- Линия литья в облицованные кокили 381
 - — в обычные кокили 358

М

- Материал стенки кокиля 193, 195, 200, 203
- Машина заливочная 363
 - карусельная 329, 348
 - кокильная 328
 - многопозиционная 336
 - однопозиционная 330, 337
- Модифицирование алюминиевых сплавов 284
 - магниевых сплавов 299
 - стали 264, 267
 - чугуна 232, 246, 260

Н

- Нанесение облицовки 307, 312
- Напряжения термические 67, 209
 - в кокиле из упругопластичного материала 73
 - в плоском кокиле 68
 - в цилиндрическом кокиле 71
 - структурные 67
 - упругие 63, 68
 - упругопластические 73
- Напыление газопламенное 88
 - плазменное 88
- Научение вербальное 151
 - моторное 151
- Научения скорость 154, 157

О

- Облицовка разовая 92
- Оснастка для литья в облицованные кокили 301, 311
- Отбел чугуна 173, 231, 245, 246
- Отливки затвердевание 14, 41
 - конструкция 184, 257, 262
 - питание 50, 52, 55, 250
 - точность размеров 185
- Охлаждение затвердевшей отливки 15
 - кокиля 12, 19
 - — воздушное 190
 - — жидкостное 196
 - — комбинированное 190
 - потока металла 14, 25
- Оценка пригодности материалов для кокилей 194

П

- Переохлаждение расплава 38, 43, 45
- Пескодупные головки 372
 - сопла 377
- Планирование 145
 - замены оборудования 146
 - износа 147
 - морального 146
 - качества 145
 - ремонта 147
 - эффективности 145, 147
- Поверхностное модифицирование и легирование 87
- Податливость 210
- Покрытия кокиля 6, 19, 77
 - классификация 77
 - свойства 77, 81, 86
 - составы 80, 81, 88, 238, 266, 282, 297 305
 - толстослойные 77, 92
 - тонкослойные 77
- Пористость в отливке 48, 50, 55
- Преимущества литья в кокиль 9, 394
- Припуски на механическую обработку отливок 185
- Проектирование 119
 - автоматизированное 182

Р

- Расширение предсудачное 48
- Ремонт кокилей 207

С

- Свойства напыленного слоя 89
- Сетка разгара 65
- Систем взаимодействие 118
 - классификация 115
 - теория 97
 - цель 118
- Система 103
 - активная 122
 - динамическая 115
 - кинетическая 115
 - кинетодинамическая 115
 - нестационарная 115
 - неравновесная 115
 - пассивная 122
 - равновесная 115
 - статическая 115
 - статодинамическая 115
 - стационарная 115
- Скорость затвердевания 15, 33, 274
 - охлаждения 40, 46, 259
- Сравнение методов литья 143
- Статика 115
- Статодинамика 115
- Стойкость кокиля 65, 132, 174, 205, 234
 - — статистическая 133
- Структура чугуна 168
- Структурная диаграмма 170
 - — Баландина 33, 169
 - — Баландина—Вейника 34
 - — Баландина—Канунникова 33
 - — Дубинина 34

Т

- Теория аналогии 98
 - информации 148, 166
 - термодинамическая 166
 - качества 100
 - подобию 97
 - систем 97
 - эффективности 100

Тезаурус 164

- Температура кокиля начальная 22, 204, 221, 224, 236, 266, 283, 294
 - средняя калориметрическая 17
- Температурное поле кокиля 18
 - — облицованного 23
 - — облицовки на стадии заливки 25
- Термическая обработка кокилей 202
 - — отливок из КЧ 259
 - — — из магниевых сплавов 293, 298
 - — — из медных сплавов 306
 - — — из серого чугуна 238
 - — — из ЧШГ 251
- Трещины в кокилях второго рода 65
 - — — первого рода 65
 - — — третьего рода 65
 - в отливках 229, 243, 260, 273, 293

У

- Ультразвуковое воздействие 287, 295
- Уравнение взаимности 112
 - диссипации 114
 - переноса 112
 - состояния 110
 - сохранения информации 101, 110
 - — энергии 101, 110
 - увлечения 114
- Усадка отливки 48, 63
 - линейная 49, 227, 242, 300
 - объемная 49
- Усилие запираия кокилей 343
 - извлечения стержня 345
- Условия однозначности 117
- Устройство для отбивки литников 371
 - окраски кокилей 207, 370

Х

- Холодильник 5

Ц

- Цикл кокиля термический 205, 313

Ч

- Черные пятна в отливках из ЧШГ 244

- Э
ЭВМ 19, 43, 168
Экстенсор 104
Электрошлаковое литье 204
Энергиал 101, 104, 106, 148
— инженера 160
— оборудования 137
— рабочего 161
— студента 160
— техника 160
— ученика 160
Энергиала единица 150
— семантика 163
— смысловой спектр 164
- Энергиор 104, 149
Энергия 102, 106
Эрозия 66, 83, 210
Эффективность экономическая 394
- Я
Явление единичное 117
— качества 107
— переноса 115
— термодинамическое 102
— технологическое 102
— состояния 115
Явления подобные 98

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- А
Айзеиштейн Я. Б. 221
Аксенов П. Н. 330
- Б
Баландин Г. Ф. 21, 33, 37, 43, 47, 169
Баранов А. А. 76
Бараускас А. П. 175
Берталанфи Л. 97, 100
Био 15
Биргер И. А. 177
Бойко Г. Г. 239
Бочвар А. А. 57
Брайен 153
Буткевичус Н. А. 169, 171, 174, 175, 177
- В
Вейник А. И. 34, 90, 162, 189, 212, 214, 223
Вин 163
Воронова Н. А. 326
- Г
Галдин Н. М. 276, 278
Гамалий В. В. 157
Гейтвуд Б. Е. 177
Генки 177
Геродот 7
Гиляревский Р. С. 162
Гиршович Н. Г. 34, 37
Гладкий И. П. 234
- Горанский Г. К. 182
Гуляев Б. Б. 34, 35, 36
Гурдин В. И. 218
- Д
Дагис В. П. 171, 174
Данилов В. И. 46
Данков П. Д. 88
Дарси 87, 210, 211
Джоуль 114
Добаткин В. И. 57
Домен В. 25
Драченев В. Ф. 179
Дубинин Н. П. 34, 233
Дульнев Г. Н. 78
Дэвис 153
- Е
Есьман Р. И. 179
- Ж
Жельнис М. В. 174
Жмакии Н. П. 179
- З
Зарецкий Л. Ш. 36, 37
Заричняк Ю. П. 78
- И
Иоффе А. Я. 34
Ищенко В. В. 162

- К
Кадлец Ю. 194
Канунников Н. Н. 33
Кельвин 149
Кирхгоф 119
Клочнев Н. И. 225, 228, 242, 243
Корбинская Б. Н. 92
Коган Л. Б. 226, 228, 229
Колмогоров А. Н. 38, 251
Комиссаров В. А. 64, 199
Константинов В. Н. 154
Коцюбинский О. Ю. 177, 194
Красаускас И. К. 174
Крюгер 152, 153
Ксенофонт В. П. 264
Кузнецов П. 100, 102
- Л
Ланда А. Ф. 34
Лебедева Г. В. 272
Ленц 114
Леонтьев В. 100
Лернер Ю. С. 249, 250
Ливитт 154
Логинов Л. А. 326
- М
Майзель В. М. 177
Майлс 154
Матюкас П. Ю. 175
Матюкене И. Б. 175
Машков А. К. 218
Мейманн 152
Мисечко В. И. 88
Михайлов А. И. 162
Моцкайтис И. И. 177
Мур 153
- Н
Навасайтис И. И. 177
Наджафов А. С. 223
Невельский Б. П. 152
Немченко Г. В. 242, 243
Новиков И. И. 228
Носков Б. А. 267
Нуссельт 43
- О
Оделевский В. И. 78
Одум 102
Ом 119
Онзагер 99, 104, 114
Орлов Н. Д. 192
Осокин А. М. 294
- П
Петриченко А. М. 88, 192
Планк М. 163
- Полетаев И. А. 167
Поляков Е. П. 218
Потапов А. А. 212, 214
Пуассон 61, 63, 68, 83, 175
- Р
Рамелите П. А. 175
Релин И. А. 278
Ровкач В. Р. 36, 37, 90
Родигин В. И. 47
Роцин М. И. 325
Рубцов Н. Н. 9, 21
- С
Самоник В. А. 369
Серебро В. С. 181, 193, 221
Снежной Р. Л. 242, 243
Соколов Е. А. 162
Спектрова С. И. 272
- Т
Тимофеев А. А. 85
Тулузов Г. Н. 88
- Ф
Фадеева К. П. 84, 86
Фундатор В. И. 279
Фурье 61
- Х
Хартер 153
Ховланд 152
Храмченков А. И. 194, 214
Христиченко П. И. 19, 177
- Ц
Цибрик А. Н. 88
Цин М. Р. 369
- Ч
Ченери Х. 100, 102
Черненко В. В. 218
Черный А. И. 162
Чернышев Е. А. 325
- Ш
Шарипова М. К. 136, 162
Шеннон 167, 168
Шестопап В. М. 394
Шицман Е. Б. 244, 245, 249, 250
Шлосберг 154
Шрамко Б. А. 8
Шурман Е. 25
- Э
Эббингауз 152

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

Раздел первый

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

Глава I. Общие сведения о литье в кокиль	5
1. Признаки и особенности процесса	5
2. Краткая историческая справка	7
3. Достоинства литья в кокиль и области его применения	9
Глава II. Тепловые основы теории литья в кокиль	12
1. Роль тепловых явлений	12
2. Термические условия формирования отливки в кокиле с тонко- слойным покрытием	13
3. Термические условия формирования отливки в облицованном кокиле	22
Глава III. Особенности кристаллизации	33
1. Управление кристаллическим строением отливок	33
2. Основные положения теории кристаллизации	37
3. Влияние переохлаждения на скорость последовательной кри- сталлизации	41
4. Начальное переохлаждение	45
Глава IV. Особенности усадочных процессов	48
1. Физическая природа усадки	48
2. Последовательное затвердевание	50
3. Объемное затвердевание	51
4. Общий случай затвердевания	54
5. Основы выбора питающих элементов	55
6. Образование зазора между отливкой и кокилем	57
7. Напряжения и деформации в отливках	63
Глава V. Стойкость кокилей	65
1. Виды и причины разрушения кокилей	65
2. Термические напряжения	67
3. Изменения в чугуна при циклическом нагреве	75

Глава VI. Основы теории кокильных покрытий	77
1. Назначение и классификация покрытий	77
2. Термофизические свойства	77
3. Термомеханические свойства	81
4. Химические и технологические свойства	86
5. Постоянные тонкослойные покрытия	88
6. Разовые толстослойные покрытия (облицовки)	92
Глава VII. Качество и эффективность и применение ЭВМ	96
1. Постановка задачи	96
2. Вывод универсальных критериев качества и эффективности	100
3. Уравнения и методы расчета качества кокиля и отливки	109
4. Примеры расчетов качества кокиля	119
5. Примеры расчетов качества отливки	135
6. Расчет квалификации литейщика	147
7. Применение ЭВМ	168

Раздел второй

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ В КОКИЛЬ

Глава VIII. Основы конструирования отливок и кокилей	184
1. Основы конструирования отливок	184
2. Основы конструирования кокилей	189
Глава IX. Изготовление и эксплуатация кокилей	198
1. Изготовление кокилей	198
2. Эксплуатация кокилей	204
Глава X. Специальные виды кокилей	209
1. Теоретические основы	209
2. Кокили из нормализованных элементов	213
3. Игольчатые кокили	214
4. Кокили, изготовленные методами порошковой металлургии	218
5. Составные кокили	221

Раздел третий

ЛИТЬЕ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ

Глава XI. Литье серого чугуна	225
1. Литейные свойства	225
2. Подготовка металла	232
3. Литниковые системы	234
4. Подготовка кокиля	236
5. Термическая обработка	238
6. Виды брака и способы его предупреждения	239
Глава XII. Литье чугуна с шаровидным графитом	242
1. Литейные свойства	242
2. Подготовка металла	246
3. Литниково-питающие системы	247
4. Термическая обработка	251
5. Виды брака и способы его предупреждения	254

Глава XIII. Литье ковкого чугуна	255
1. Особенности и возможности процесса	255
2. Конструирование отливок	257
3. Литниково-питающие системы	257
4. Режим отжига и управление структурой	259
5. Виды брака и способы его предупреждения	260
Глава XIV. Литье стали	262
1. Особенности процесса и свойства стали	262
2. Литниково-питающие системы и заливка	264
3. Параметры-технологии	265
4. Особые случаи литья	266
5. Виды брака и способы его предупреждения	269
Глава XV. Литье алюминиевых сплавов	271
1. Характеристика сплавов	271
2. Влияние скорости затвердевания отливок	274
3. Литниково-питающие системы	276
4. Особенности устройства кокилей	279
5. Подготовка кокилей и температура заливки	281
6. Подготовка металла и заливка	283
7. Особые случаи литья	285
8. Виды брака и способы его предупреждения	289
Глава XVI. Литье магниевых сплавов	292
1. Свойства магниевых сплавов	292
2. Особенности литья	294
3. Литниковые системы	295
4. Подготовка и заливка кокилей	297
5. Термическая обработка и виды брака	298
Глава XVII. Литье медных сплавов	300
1. Краткая характеристика сплавов	300
2. Особенности процесса и качество отливок	301
3. Особые случаи литья	304
4. Защитные покрытия, заливка и термическая обработка	305
Глава XVIII. Литье в облицованные кокили	307
1. Особенности технологии	307
2. Литье чугуна	316
3. Литье стали	323
4. Литье цветных сплавов	326

Раздел четвертый

МЕХАНИЗАЦИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Глава XIX. Кокильные одно- и многопозиционные машины	328
1. Основные требования и направления механизации	328
2. Универсальные стационарные машины	330
3. Специальные стационарные машины	336
4. Методы расчета основных параметров	343
5. Карусельные машины	348
6. Кокильные конвейеры	356

Глава XX. Автоматизированные линии	358
1. Линия литья в обычные кокили	358
2. Механизация и автоматизация заливки кокилей	363
3. Устройства для окраски кокилей	370
4. Устройства для отбивки литников, съема и транспортировки отливок	371
5. Особенности механизации процесса литья в облицованные кокили	372
Глава XXI. Организация производства	388
1. Основные принципы проектирования цехов	388
2. Примеры проектных решений цехов	389
3. Техничко-экономические показатели	394
Список литературы	397
Предметный указатель	406
Именной указатель	410

ИБ № 661

Савелий Леонидович БУРАКОВ, Альберт Иозефович ВЕЙНИК,
Николай Петрович ДУБИНИН и др.

ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

Редактор Н. С. Степаиченко
Художественный редактор Ю. Г. Ворончихин
Технические редакторы: А. И. Захарова, Т. И. Андреева
Корректор А. А. Снастина
Переплет художника С. Н. Орлова

Сдано в набор 30.10.79. Подписано в печать 21.04.80. Т-08328.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.
Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 26,0.
Уч.-изд. л. 28,1. Тираж 5 600 экз. Заказ 1566. Цена 3 р. 30 к.

Издательство «Машиностроение». 107076, Москва, Б-76,
Стромынский пер., 4.

Ленинградская типография № 6 Ленинградского
производственного объединения «Техническая книга»
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, Ленинград, С-144, ул. Моисеенко, 10.